



INNOVACIÓN BASADA EN CONOCIMIENTO CIENTÍFICO

B. SANTELICES, F. LUND
T. COOPER, J. A. ASENJO
EDITORES



Academia Chilena de Ciencias

INNOVACIÓN BASADA EN CONOCIMIENTO CIENTÍFICO

Estudio en homenaje a los 50 años
del Instituto de Chile y de la Academia
Chilena de Ciencias

Editado por:

Profesor Bernabé Santelices

*Premio Nacional de Ciencias Naturales
Miembro de Número de la
Academia Chilena de Ciencias*

Profesor Fernando Lund

*Premio Nacional de Ciencias Exactas
Miembro de Número de la
Academia Chilena de Ciencias*

Profesor Tomás Cooper

*Miembro de Número de la
Academia Chilena de Ciencias*

Profesor Juan Asenjo

*Premio Nacional de Ciencias Aplicadas
Miembro de Número de la
Academia Chilena de Ciencias*



Innovación basada en conocimiento científico

Estudio en homenaje a los 50 años del Instituto de Chile y de la
Academia Chilena de Ciencias.

Coordinador Editorial

Marcela Reyes Azancot

Corrector de estilos

Alejandro Cisternas

Diseño gráfico:

Claudio Silva Castro

Diseño de portada:

Juan Manuel Neira

I.S.B.N.: 978-956-XXXX-XX-X.

1a edición: diciembre de 2013.

©2013 por Academia Chilena de Ciencias. Registro N° XXX.XXX.

Santiago de Chile. Derechos reservados.

Editado por Academia Chilena de Ciencias.

Almirante Montt 454. Teléfono 248112841. E-mail: academiaciencia@123.cl
Santiago de Chile.

Impreso por Graficandes ®.

Santo Domingo 4593. Santiago de Chile.

Agradecimientos

Los editores agradecen al Ministerio de Educación de Chile por su contribución de recursos para realizar este estudio.

Agradecen, además, a Juan José Ugarte, Jefe de la División de Educación Superior (2010-2013), quien impulsó fuertemente la idea de este estudio, a Víctor Valdivia, División de Educación Superior del Ministerio de Educación y a Cristóbal Undurraga, Gerente de emprendimiento del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, por sus valiosos consejos y ayuda en el desarrollo de este trabajo.

Un reconocimiento especial a Marcela Reyes, Coordinadora de la Academia de Ciencias, por su ayuda durante los procesos de impresión y durante los procesos de impresión y producción del libro y al Dr. Marcelo Bobadilla, por la coordinación del estudio, el manejo de los manuscritos y la confección del índice de autores.

Nuestros agradecimientos para los autores, científicos y representantes de empresas, que no sólo contribuyeron con sus ideas y escritos, sino que además han dado una muestra de cómo se puede dialogar entre la ciencia y el mundo productivo.

Prefacio

Este libro se originó por encargo del Ministerio de Educación a la Academia Chilena de Ciencias. La Dirección de Educación Superior del ministerio estaba interesada en conocer, sobre la base de experiencias reales, la situación actual de Chile en materia de innovación, ciencia y tecnología. Este conocimiento debiese permitir la identificación de debilidades existentes, evaluar la efectividad de políticas e iniciativas implementadas hasta ahora, así como recomendar cambios y mejoras necesarias para disminuir las limitantes que aún persisten.

La Academia Chilena de Ciencias formuló entonces un proyecto de investigación y análisis cuya propiedad intelectual se encuentra inscrita en el Registro de Propiedad Intelectual con el N° 209.882, a nombre de la Academia Chilena de Ciencias. El estudio incorporó 11 áreas temáticas a las que posteriormente se agregó una decimosegunda. En su selección, la Academia inició el trabajo con los casos de innovación que le eran más conocidos, a partir de la experiencia de sus miembros. Luego se seleccionó a un científico de prestigio en investigación científica y desarrollo de innovaciones en la respectiva área, quien, junto con un equipo de 3-5 personas, tuvo la responsabilidad de elaborar un documento que comprendía dos secciones. La primera se orientó al análisis del estado de innovación (entendida como un instrumento de creación de riqueza) en el área respectiva, sus niveles de desarrollo en el ámbito nacional o internacional y la propensión hacia esta actividad en esta área de desarrollo en el país.

La segunda sección fue un análisis en profundidad, sobre la base de un ejemplo específico desarrollado en Chile, de una innovación basada en la creación de conocimiento científico en el área. En esta sección fue de especial interés la identificación del caso específico de estudio, incluyendo el conocimiento científico usado, el producto desarrollado y la riqueza creada. El análisis del ejemplo debía incluir también análisis crítico sobre la contribución de varias instituciones a estos desarrollos, tales como organismos del Estado con responsabilidad sobre políticas de desarrollo de la innovación en el país, universidades, empresas, instrumentos gubernamentales que financian investigación e innovación, así como los niveles de formación de profesionales y técnicos que participaron en su desarrollo.

Los elementos de análisis en cada una de las 12 áreas consideradas constituyen los capítulos de este libro. Tres áreas (ciencia de los materiales, informática y pesquería) incorporaron dos ejemplos específicos cada uno, lo que llevó el número de ejemplos a 15. Dos capítulos transversales (capítulos 13 y 14) fueron agregados a los capítulos temáticos. Uno de ellos, (capítulo 13) sintetiza los principales aprendizajes que sur-

gen de los casos de innovación, incluyendo sus patrones y factores de desarrollo. El segundo (capítulo 14) sugiere recomendaciones globales de cambios y mejoras dirigidos a los actores involucrados en el sistema (Gobierno, Sector Productivo y Universidades), de tal forma que estos se articulen de manera mas eficiente y se fortalezca la innovación con base científica que se produce en Chile. Aunque en estos dos últimos capítulos se sacan lecciones a partir de análisis detallados de ejemplos específicos, el libro no pretende ser un análisis exhaustivo de todos los casos posibles. De hecho, durante la elaboración del libro surgieron ejemplos adicionales, cuyo estudio sería interesante de acometer en un segundo estudio futuro.

En el trabajo colaboraron 32 científicos y 21 representantes de empresas. Los textos fueron corregidos y editados por 4 editores, también científicos, con sugerencias y contribuciones adicionales de dos expertos en innovación, uno del Ministerio de Educación y otro del Ministerio de Economía. Así, este libro es el resultado del trabajo integrado de 59 personas.

El énfasis en todos los casos está puesto en innovación basada en conocimiento científico. Este tipo de emprendimiento es un fenómeno relativamente joven, pero uno con un elevado potencial de transformación del tejido productivo. Los casos de estudio son una buena muestra de cómo el mundo de la investigación y el de la empresa pueden dialogar, trasladando a la sociedad los resultados de la investigación y permitiendo beneficios transversales y desarrollo para el conjunto de los ciudadanos.

Este conjunto de casos de innovación cubre un espectro amplio de años de actividad. Los más antiguos (por ejemplo el caso del Convertidor Teniente; Conca y col. 2013; o el caso de un modelo de crecimiento forestal, Bown y col. 2013) se iniciaron en la década de los años 70, orientando la investigación hacia aspectos específicos de desarrollo, que han continuado posteriormente para completar la información, construir modelos adicionales y complementarios. Otros casos tienen menor antigüedad e incluso hay desarrollos que están recién expresándose en la formulación de nuevas empresas para su explotación. En su conjunto, sin embargo, todos ellos muestran que experiencias exitosas de innovación de base científica han existido en el país desde hace 40 años por lo menos y que su frecuencia e importancia está aumentando en años recientes.

La mayoría de los casos de innovación discutidos se inscriben en sectores productivos de alta importancia en la determinación del PIB nacional. Estos son los casos de las áreas agropecuarias y silvícola, de la pesca y la acuicultura, del sector de minería, de los sectores de construcción y vivienda y el de salud. Este conjunto contribuye en la actualidad con sobre el 60 % del valor actual del PIB nacional. Más aún, los casos de innovación que aún no representan sectores productivos de importancia, tales como energía, informática y medio ambiente tienen importancia estratégica para el desarrollo nacional, incluyendo la relación con el resto del mundo.

Varios de estos sectores productivos se distinguen, además, por la posición relativa que el país ha alcanzado en los ordenamientos internacionales de producción. A manera de ejemplo, el sector agropecuario de Chile ocupa el lugar 17 en el valor de alimento exportado en un universo de 200 países (Peña y col., 2013). En el sector pesquero, Chile exhibe un desembarque anual sostenido de 3-4 millones de toneladas métricas, ocupando entre el 5° y el 7° lugar entre los países pesqueros del mundo (Castilla y col., 2013). Aproximadamente el 65 % de esta producción corresponde a acuicultura y el 35 % restante a especies no cultivadas (Buschmann y col., 2013). En el sector minero, en tanto, Chile sobresale por ser responsable de aproximadamente el 9,5 % de la producción pirometalúrgica de cobre en el mundo, situándose en tercer lugar en la producción de cobre fino de fundición, tras China y Japón (Conca y col., 2013). Es evidente que estos desarrollos no se han logrado solo como consecuencia de los casos de innovación explicitados en este volumen, pero ellos garantizan que estos estudios se inscribieron en áreas de mucha importancia para el desarrollo del país y que en alguna medida contribuyeron a los resultados económicos actuales.

Un conjunto de ejemplos de innovación se orientan a reducir riesgos y efectos dañinos de actividades naturales o humanas, además de incrementar los retornos económicos. Estos son los casos de innovaciones en Ingeniería estructural (Protección sísmica), Salud (Inmunoterapia celular) y Gestión Ambiental. En estos casos, el éxito de la innovación está condicionado por la sustentabilidad del sistema frente al riesgo correspondiente. Sustentabilidad es una condición que también afecta otros sectores productivos, tales como el sector pesquero, el agropecuario o el forestal.

Quizás debido a los efectos dañinos que contrarrestan, el crecimiento de las innovaciones en algunos de estos ámbitos es notable. Por ejemplo, los disipadores de energía sísmica se empezaron a desarrollar en Chile a comienzo de los años 90 (Sarrazín y col. 2013). Actualmente se encuentran contruidos, en construcción o en proyecto alrededor de 50 estructuras (edificios, puentes, etc.) con disipadores de energía. La inversión en la construcción de estos disipadores se estima (Sarrazín y col., 2013) en valores del orden de 15 millones de dólares, mientras que las inversiones que protegen son de varios órdenes de magnitud ese valor.

El caso de innovación en salud se orientó a la creación y elaboración de productos inmunoterapéuticos para tratar el cáncer a la piel. Se inició hace más de 10 años y su aplicación ya ha retornado sobre \$5 mil millones con beneficios económicos calculados en términos de productividad y ahorro en gastos de salud por alrededor de \$450 millones/año (Rosemblatt y col. 2013).

Como se indicó previamente, varios de los sectores incluidos, como informática, gestión medioambiental y energía tienen importancia estratégica para el desarrollo. Ciencia de los materiales debiera ser agregado a

esa lista, con énfasis especial en la flexibilidad que muestra dicha actividad y las profundas transformaciones que está impulsando en los procesos de manufactura. Con el nacimiento de la nanotecnología, la búsqueda de nuevos materiales derivó en la introducción de partículas a escala nanométrica a los polímeros, con aplicaciones muy variadas (Quijada y col., 2013). Con ello se lograron mejores propiedades físico-químicas, así como nuevas aplicaciones. En la actualidad hay una amplia demanda de numerosos tipos de industrias (por ejemplo, embalajes, automotriz, aeronáutica y otras) por materiales cada vez más livianos y con mejores propiedades mecánicas. A nivel mundial se espera que este mercado supere las 330.000 toneladas métricas de consumo, con valores comerciales sobre los 2,4 mil millones de dólares anuales (Quijada y col., 2013).

Esta caracterización de los sectores en los que han ocurrido los casos de innovación descritos en este libro sugiere que estas son áreas muy dinámicas, altamente productivas y competitivas. Los casos de innovación de más larga data muestran que estos procesos pueden llegar a ser largos y complejos, con un componente-tecnológico fuerte, sobre los que se van construyendo nuevas innovaciones, ya sea refinando o complementando los primeros hallazgos. Con frecuencia estos desarrollos escapan a la típica investigación académica que se centra en explorar determinadas hipótesis. Pero a menudo ella también requiere un conocimiento científico básico sobre el cual empezar a construir. Emprendimiento basado en conocimiento científico es una de las vías a través de las cuales se puede incrementar el retorno de la inversión en I+D realizada por el país y del nuevo conocimiento generado. Los 15 casos incorporados en este libro son ejemplos de esos retornos y de cómo la capacidad científico-tecnológica instalada en nuestras universidades ha podido contribuir al emprendimiento científico y al desarrollo económico del país.

Bernabé Santelices
Fernando Lund
Diciembre 2013

Contenidos

1. **Área acuicultura:** Modelo de dispersión del virus ISA(ISAv) basado en simulación numérica del océano y la atmósfera: alcances y desafíos 15
Alejandro H. Buschmann, Gonzalo Olivares, Patrick Dempster, Víctor Valerio y Marcos Godoy.
2. **Área agropecuaria y alimentos:** Sector agropecuario y de alimentos. 33
Álvaro Peña N., Claudio Pastenes V., Rodrigo Infante E., Roberto Neira R., Ignacio del Río G. , Jorge Lazcano C. y Sebastián Monckeberg V.
3. **Área ciencia de los materiales:** Desarrollo de nuevos materiales, casos de investigación con impacto comercial en nanotecnología y nuevos usos del cobre 53
Raúl Quijada, Humberto Palza, René Rojas y David Vargas.
4. **Área energía:** Desarrollo de un sistema de correa transportadora con capacidad para regenerar energía eléctrica 83
Rodrigo Palma, Juan C. Araneda, Walter Brokering, Guillermo Jiménez, Luis Morán y Hugh Rudnick.
5. **Área forestal:** Valor agregado de los modelos de crecimiento y producción en la industria forestal. 99
Horacio E. Bown, Jean-Pierre Lasserre, Roland Peters, Fernando Dunn, Cristian Higuera y Julio Tobar.
6. **Área ingeniería estructural:** Sistemas de protección sísmica mediante aislación basal y disipación de energía 125
Mauricio Sarrazin, José L. Almazán, Tomás Guendelman, María O. Moroni y Rodrigo Retamales.
7. **Área informática:** Yahoo! labs Santiago 147
Ricardo Baeza-Yates y Mauricio Marín.

8. **Área gestión ambiental:** Innovación en la gestión ambiental:
el caso de insumos biotecnológicos creados en base
a microorganismos nativos 169
*Francisco Bozinovic, Eduardo Donoso, F. Fernando Novoa y
Javier A. Simonetti.*

9. **Área minería:** El Convertidor Teniente, un caso emblemático
de innovación tecnológica en minería 187
*Carlos Conca, Ramón Fuentes, Raúl Gormaz,
Patricio Ruz y Leandro Voisin.*

10. **Área nanotecnología:** Desarrollo de envases plásticos
con capacidad antimicrobiana para el envasado de
salmón fresco 213
Miguel Kiwi, María José Galotto y Abel Guarda.

11. **Área pesquería:** Innovaciones en manejo pesquero y
conservación en Chile 235
Juan C. Castilla, Carlos A. Moreno y Héctor Bacigalupo.

12. **Área salud:** Desarrollo de inmunoterapia celular para
el tratamiento del cáncer 257
*Mario Rosemblatt, Alberto Fierro, Jorge Martínez, Flavio Salazar
y Andrés Stutzin*

13. **Análisis de los casos de innovación descritos** 275
Fernando Lund y Bernabé Santelices.

14. **Innovación con base científica: observaciones para el
análisis y la formulación de políticas públicas** 289
Bernabé Santelices y Fernando Lund.

Afiliación de los autores

JOSÉ L. ALMAZÁN. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Ingeniería Santiago Chile.

JUAN C. ARANEDA. TRANSELEC, Santiago, Chile.

HÉCTOR BACIGALUPO. Sociedad Nacional de Pesca Chile.

RICARDO BAEZA-YATES. Yahoo! Labs Santiago, Universidad de Chile, Departamento de Ciencia de la Computación, Santiago, Chile.

HORACIO E. BOWN. Facultad de Ciencias Forestales y de Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile.

FRANCISCO BOZINOVIC. Facultad de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile.

WALTER BROKERING. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile.

ALEJANDRO H. BUSCHMANN. Centro i-mar, Universidad de Los Lagos, Puerto Montt.

JUAN C. CASTILLA. Facultad de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile.

CARLOS CONCA, CMM-DIM, Universidad de Chile.

IGNACIO DEL RÍO G. San José Farms S.A.

PATRICK DEMPSTER. Gerente General Aquagen S.A., Puerto Montt, Chile.

EDUARDO DONOSO. Bio Insumos Nativa Ltda.

FERNANDO DUNN. Asesor Forestal. Ex Presidente Directorio Modelo Nacional Simulación.

ALBERTO FIERRO. Clínica Las Condes, Santiago, Chile.

RAMÓN FUENTES. JRI-Ingeniería Ltda.

MARÍA JOSÉ GALOTTO. Centro para el Desarrollo de la Nanociencia y la Nanotecnología (CEDENNA) y Laboratorio de Envases (LABEN-CHILE). Depto. de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad Tecnológica, Universidad de Santiago de Chile.

MARCOS GODOY. Gerente Técnico ETECMA EIRL, Puerto Montt, Chile.

RAÚL GORMAZ. CMM-DIM Universidad de Chile.

ABEL GUARDA. Centro para el Desarrollo de la Nanociencia y la Nanotecnología (CEDENNA) y Laboratorio de Envases (LABEN-CHILE). Depto. de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad Tecnológica, Universidad de Santiago de Chile.

TOMÁS GUENDELMAN. IEC Ingeniería S.A. Santiago, Chile.

CRISTIAN HIGUERA. Investigador Modelo Nacional de Simulación de Crecimiento.

RODRIGO INFANTE E. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Departamento de Producción Agrícola.

GUILLERMO JIMÉNEZ. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile.

MIGUEL KIWI. Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile.

JEAN-PIERRE LASSERRE. Gerente de Tecnología Silvícola, Forestal Mininco S.A.

JORGE LAZCANO C. Nestlé Chile S.A.

FERNANDO LUND. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

MAURICIO MARÍN. Universidad de Santiago, Departamento de Ingeniería e Informática.

JORGE MARTÍNEZ. Laboratorio de Biología Celular INTA, Universidad de Chile Santiago.

SEBASTIÁN MONCKEBERG V. Vilkun S.A.

LUIS MORÁN. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Concepción, Chile.

CARLOS A. MORENO. Instituto de Ciencias Ambientales y Evolutivas, Universidad Austral de Chile.

MARÍA O. MORONI. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

ROBERTO NEIRA R. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Producción Animal.

F. FERNANDO NOVOA. Centro de Ecología Aplicada Ltda.

GONZALO OLIVARES. Centro i-mar, Universidad de Los Lagos, Puerto Montt.

RODRIGO PALMA. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile.

HUMBERTO PALZA. Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

CLAUDIO PASTENES V. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Producción Agrícola.

ÁLVARO PEÑA N. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Agroindustria y Enología.

ROLAND PETERS. Director, Modelo Nacional de Simulación, Universidad de Concepción.

RAÚL QUIJADA. Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

RODRIGO RETAMALES. RBA Ingenieros, Santiago Chile.

RENÉ ROJAS. Depto. de Química Inorgánica, Facultad de Química, Pontificia Universidad Católica de Chile.

MARIO ROSEMBLATT. Fundación Ciencia & Vida, Santiago, Chile.

HUGH RUDNICK. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile.

PATRICIO RUZ. AMEC International Ltda. Mining & Metals.

FLAVIO SALAZAR. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

BERNABÉ SANTELICES. Facultad de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile.

MAURICIO SARRAZIN. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile.

JAVIER A. SIMONETTI. Universidad de Chile.

ANDRÉS STUTZIN. Facultad de Medicina Universidad de Chile, Santiago, Chile.

JULIO TOBAR. Jefe Departamento de Desarrollo de Dasometría, Forestal Mininco S.A.

VÍCTOR VALERIO. Gerente de Innovación y Desarrollo, Salmones Friosur S.A., Puerto Montt, Chile.

DAVID VARGAS. Director Ejecutivo DUAM S.A., Innovación al Sur del Mundo.

LEANDRO VOISIN. Departamento de Ingeniería de Minas Universidad de Chile.

ÁREA ACUICULTURA

Modelo de dispersión del virus ISA(ISAv) basado en simulación numérica del océano y la atmósfera: alcances y desafíos

Alejandro H. Buschmann (Coordinador),
Centro i-mar, Universidad de Los Lagos,
Puerto Montt, Chile

Gonzalo Olivares,
Centro i-mar, Universidad de Los Lagos,
Puerto Montt, Chile

Patrick Dempster,
Gerente general, Aquagen S. A.,
Puerto Montt, Chile

Víctor Valerio,
Gerente de innovación y desarrollo, Salmones Friosur S. A.,
Puerto Montt, Chile

Marcos Godoy,
Gerente técnico, ETECMA EIRL,
Puerto Montt, Chile

Resumen

La innovación se asocia a la aplicación de nuevas ideas y existe solo si esta genera valor para el usuario. De la empresa Salmones Friosur surgió la necesidad de contar con una herramienta de simulación numérica oceanográfica-atmosférica para la estimación de riesgos sanitarios derivados de la dispersión de ISAv desde centros de engorda de salmón en Chile. De esta iniciativa empresarial nace OASC, que permitió crear una alianza empresa-universidad, donde participan académicos de las universidades de Los Lagos y de Concepción. Así, en un plazo de solo seis meses, OASC desarrolló una metodología de simulación numérica que permitió al usuario decidir dónde realizar las primeras siembras tras la

paralización de operaciones durante la crisis sanitaria del ISAv. Además, mostraron la influencia determinante del forzamiento atmosférico sobre la posición y extensión del área en riesgo, aspecto no considerado inicialmente por otros modelos. Brotes posteriores de ISAv han demostrado que este método permite predecir los riesgos de infección. A partir de este modelo se han formado nuevas versiones para estimar los halos de influencia por parásitos de salmones y otras modificaciones para calcular la carga de peces que soporta un sitio de producción, la mejor posición de los centros o cuánto alimento ingresar según la intensidad de las corrientes y disponibilidad de oxígeno. Tanto los métodos como los resultados de su aplicación han sido mostrados en foros empresariales y científicos, con participación de organismos del Estado. A pesar de ello, la comercialización de estos productos está aún en una fase de consolidación económica. Ello estriba en que las empresas consideran que disponer de esta metodología corresponde a las obligaciones del Estado o de Salmon-Chile. Por otra parte, Subpesca considera que es necesario normar sobre estos temas basados en información generada por IFOP. Este ejemplo permite mostrar algunas de las brechas y dificultades existentes para desarrollar innovación en acuicultura.

Aspectos generales sobre innovación en acuicultura

El desarrollo de la acuicultura a nivel global ha venido experimentando un crecimiento sostenido como alternativa al uso de recursos pesqueros cada vez más escasos (Duarte *et al.*, 2007). Este desarrollo ha requerido esfuerzos que van desde la ciencia básica para domesticar especies hasta desarrollos tecnológicos de sistemas productivos, generación de nuevos alimentos e implementación de nuevas tecnologías sanitarias, entre otras. En el caso particular de Chile, la producción en acuicultura llegó a valores de 361.000 toneladas en 1998, alcanzando una producción superior a las 870.000 toneladas en el año 2010 (Figura 1). Ello posicionó al país entre los 10 primeros productores y primero del mundo occidental en maricultura. Esta producción está basada, principalmente, en el cultivo de salmonídeos, moluscos y algas (Buschmann *et al.*, 2013). Dentro de cada uno de estos tres grupos de organismos que se encuentran en producción, existe gran variedad de especies (Figura 2). Aunque en el caso de los peces esta producción aún está constituida principalmente por especies introducidas o exóticas, en el de moluscos y algas el cultivo se centra en especies nativas, basado en trabajos de investigación que han permitido que esta actividad productiva exista. Este explosivo desarrollo productivo, sustentado por especies exóticas, se ha basado principalmente en la internalización de tecnologías foráneas de producción con muy escaso soporte científico asociado a esta actividad (Buschmann *et al.*, 2009). En el presente trabajo abordamos el impacto actual del desarrollo científico y tecnológico en Chile y su influencia en innovación de

la acuicultura. Expondremos un análisis del estado de la innovación de la acuicultura chilena, basado tanto en entrevistas a expertos como en estadísticas productivas y de desarrollo científico. Finalmente, mostraremos un caso específico de innovación basada en conocimiento, donde la interacción universidad-empresa ha sido fundamental para lograr productos concretos que permiten mejorar los rendimientos productivos y disminuir algunos riesgos que tiene esta actividad.

La búsqueda de publicaciones entre los años 1988 y 2013 en la Web of Knowledge (WK, 2013), utilizando como filtros de búsqueda los términos *aquaculture*, *marine farming* y *mariculture*, entregó 161.77 registros. Solo el 2,2 % de estos (348) tienen autoría de investigadores chilenos y/o han sido realizados en Chile. Este número parece no haber variado sustantivamente del 2 % indicado en un estudio publicado el año 2005 (Castilla *et al.*, 2006). Esta producción de artículos científicos posiciona a Chile en el país número 16 en cuanto a publicaciones científicas del área, lo cual contrasta con la séptima posición que el país ostenta en términos de producción de biomasa según la estadística mostrada por Buschmann *et al.* (2013). Estos estudios han sido financiados principalmente por el Fondo de Nacional de desarrollo Científico y Tecnológico (Fondecyt) y por el Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondef) en segundo lugar, pero entre ambos han financiado menos del 1 % de los estudios desarrollados a nivel mundial. Es relevante señalar que si bien el número de investigadores de Ciencias del Mar ha aumentado, el número de estos asociados al sector acuícola en el año 2005 era tan solo 50 (ver Castilla *et al.*, 2006), número que no parece condecirse con los requerimientos de un país que tiene una producción acuícola mayor a 800.000 toneladas de biomasa procedente de distintas especies. Estos indicadores revelan que la creación de conocimiento es relativamente baja en relación con el nivel de producción que Chile ha alcanzado en las últimas dos décadas y que además tenemos limitaciones de científicos calificados en el ámbito de la acuicultura. De la mencionada búsqueda en la Web of Knowledge, solo aparece un científico chileno entre los 100 de mayor impacto en acuicultura. Por otra parte, el número de patentes producidas en Chile no supera el 30 % del total de las que se presentan en el país en el sector de acuicultura (Buschmann y colaboradores, datos no publicados). Los cálculos de inversión en I+D+i acuícola en Chile muestran que esta es altamente variable y para el caso particular de salmonídeos, no supera los 9 dólares por tonelada (Medina, 2009). Las estimaciones de inversión en I+D+i para el período 1987-2005 son de alrededor de 31 millones de dólares, lo que contrasta con la inversión de Noruega de 60 millones de dólares solo para el período 1988-1990 (Davy *et al.*, 2012). Todos estos indicadores revelan la limitada generación de conocimiento en acuicultura en Chile y que su transferencia al sector productivo tampoco es suficiente.

Consultados expertos del área productiva, de servicios y de investigación, asociados a la acuicultura, un alto porcentaje de ellos (45 %) señalan

que el desarrollo de esta actividad en Chile ha sido altamente innovadora, logrando importantes desarrollos tecnológicos y de innovación, tales como nuevos sistemas de inyección de plásticos para fabricación de boyas; uso de mallas de cobre para prevenir la adhesión de organismos incrustantes; adaptación de tecnologías para la alimentación remota de peces; desarrollo de nuevos sistemas de fondeo y de balsas adaptadas a sistemas de alta complejidad oceanográfica, y adecuación de tecnologías de robótica, por citar algunos de los ejemplos. Estos casos muestran la tendencia y capacidad de la industria acuícola chilena para adaptarse y responder a los nuevos requerimientos que imponen los mercados. Sin embargo, las innovaciones anteriormente señaladas, si bien ponen de relieve un impacto productivo positivo para las empresas, no están significativamente asociadas a innovaciones basadas en generación de conocimiento científico específico.

Consultado el panel de expertos, emergen solo tres ejemplos de innovación acuícola basada en generación de conocimiento. El primero, indicado por 20 % de los entrevistados, hace referencia a las vacunas desarrolladas para prevenir enfermedades de alto riesgo en acuicultura, aunque también enfatizan los entrevistados que si bien esta innovación ha generado gran impacto económico para las empresas productoras de las vacunas, el beneficio en la producción acuícola de especies, especialmente en salmones, ha sido o ha tenido repercusión limitada. El segundo ejemplo, señalado por 15 % de los entrevistados, destaca, como una innovación relevante basada en conocimiento, el desarrollo de modelos oceanográficos aplicados a la acuicultura. Los entrevistados también mencionaron, al respecto, que los beneficios económicos de la aplicación de estos modelos aún no se expresan en la generalidad de la industria y su impacto está acotado a solo algunas empresas que han internalizado su uso. Por último, 5 % de los expertos consultados indicaron que el desarrollo basado en la generación de conocimiento ha sido altamente relevante para la producción de algas marinas con alto impacto social en el sector.

Frente a la propuesta de identificar las situaciones que con más urgencia requieren innovación en la acuicultura chilena actual, los expertos coincidieron con el mayor nivel de consenso (12,5 %), en primer lugar, en los problemas sanitarios de la industria frente a organismos parásitos y/o patógenos; entender la dinámica oceanográfica regional y local; contar con bioindicadores de calidad ambiental y generar capacidades eficientes que permitan biorremediación de diferentes problemas ambientales. El 9 % de los entrevistados señalaron como requerimiento urgente para la acuicultura actual de Chile la diversificación e incorporación de especies nativas que aporten productos con valor agregado. Además, se citaron otros temas más puntuales que también requieren ciencia y tecnología para generar procesos de innovación, tales como desarrollo operacional y de logística, tratamientos de lodos y riles en los procesos productivos,

búsqueda y producción de materias primas para la producción de alimento, control de depredadores, entre otros.

Si bien se reconoce que, a pesar de que la acuicultura en Chile ha alcanzado altos niveles de producción, aún existe limitada e insuficiente investigación científica y tecnológica que respalde y refuerce esta actividad. No obstante, los expertos admiten que, durante los últimos dos o tres años, el concepto de innovación basado en generación de conocimiento está siendo incorporado en los procesos de desarrollo de la empresa acuícola chilena. El 40 % de los consultados señalan que el punto que limita la innovación en Chile es más bien de tipo estructural y reglamentario, en tanto que 35 % lo asocia a la baja asignación de financiamiento para estos fines. Para mejorar las políticas de innovación en acuicultura, el 39 % de los expertos señala que es necesario buscar sistemas de cooperación y asociatividad entre las instituciones de ciencia y tecnología y la empresa. Como una forma de avanzar más decididamente proponen la generación de un centro de innovación en acuicultura que incorpore todos los temas aquí expuestos.

Por otra parte, el 19 % de los consultados sugieren dar mayor importancia a la formación de capital humano en ciencia y tecnología para apoyar y reforzar la implementación de prácticas de innovación en acuicultura, incorporando el requerimiento incluso a nivel gerencial de las empresas acuícolas. El 16 % señala, además, la relevancia en la búsqueda de nuevos mecanismos que permitan aumentar el financiamiento destinado a la innovación, sea por incentivos tributarios u otros mecanismos que permitan mejorar la asignación de recursos con respecto al PIB. En términos generales, emerge como consenso que la interacción entre universidades y empresa es un elemento que aun requiere de ajustes para lograr sinergias que perduren en el tiempo.

Un ejemplo de innovación en acuicultura

Historia del ejemplo

La salmonicultura es el principal producto de la acuicultura chilena, tanto en biomasa como en retorno económico, para el país (Figura 1). En el año 2006, Chile llegó a producir 647.000 toneladas de salmonídeos, que durante 2009 disminuyeron, aproximadamente, en 20 % (Figura 1) como consecuencia de la propagación del virus ISA (ISAv) en el sur de Chile (Godoy *et al.*, 2008). Debido a las repercusiones económicas y sociales de esta fuerte caída en la producción, el sector productivo logró llegar a ciertos acuerdos con el Estado de Chile. De estos acuerdos emanaron ciertas medidas regulatorias que auguraban recuperar la producción. Una de estas medidas fue la creación de “barrios de producción de salmonídeos” en los que se debían establecer y supervisar ciertas prácticas sanitarias que frenaran la transferencia de patógenos entre los distintos sectores

de producción. Técnicamente, este concepto de “Barrios” hoy se conoce como Agrupación de Concesiones. Aceptada la medida y establecida la Ley de Agrupación de Concesiones, se evidenciaron otras limitaciones, que hasta entonces para muchos habían pasado inadvertidas, como el desconocimiento del movimiento de masas de agua en la región y, por tanto, entre sectores productivos (Buschmann *et al.*, 2009). Ante este nuevo escenario era muy difícil limitar la transferencia de patógenos entre centros de producción, lo que motivó a distintos grupos de investigadores a desarrollar modelos oceanográficos con aplicaciones productivas en acuicultura y generando, como consecuencia, innovaciones en las prácticas acuícolas incorporadas inmediatamente por algunos productores. La interacción entre investigadores de la universidades de Los Lagos y de Concepción, en un período de 1 a 2 años, permitió desarrollar una herramienta de simulación numérica oceanográfico-atmosférica para la estimación de riesgos sanitarios derivados de la dispersión de partículas virales de ISA.

El desarrollo de este modelo está basado en la aplicación de una serie de algoritmos destinados a simular el transporte de patógenos entre centros de engorda de salmónidos ubicados en los canales australes de Chile. Todo el *software* utilizado para las simulaciones corresponde a código abierto y libre, originado y mantenido por comunidades académicas internacionales especializadas. Los principales desafíos para el desarrollo consisten en la obtención y formateo adecuado de la información que sirve para a) definir la geometría de los dominios que se tienen que simular, b) inicializarlos y c) definir las condiciones en los bordes y las forzantes que en ellos debe aplicarse para lograr una simulación que sirva de solución a la industria acuícola. Lo anterior requiere la adecuada implementación de cada uno de los sistemas de simulación y de los esquemas que permiten la paralelización de los mismos, a fin de conseguir tiempos de cómputo razonables dada la capacidad de cálculo limitada que normalmente se dispone. La *suite* de modelos utilizados para generar la solución consiste en un modelo atmosférico de mesoescala denominado Weather Regional Forecasting Model (WRF; <http://www.wrf-model.org>), un sistema de simulación hidrodinámica a escala regional denominado Regional Oceanographic Modelling System (ROMS; <http://www.myroms.org>) y un modelo de transporte lagrangiano basado en individuos (Ichthyop; Lett, 2008). El objetivo de la simulación atmosférica es generar el forzamiento adecuado de la superficie del agua en el dominio que será simulado con el modelo hidrodinámico. Según la solución requerida por el cliente, WRF se inicializa y recibe condiciones de borde desde bases de datos climatológicas, reanálisis de bases de datos o a partir de las salidas de modelos operacionales que simulan toda la atmósfera del planeta. El objetivo de la simulación hidrodinámica es obtener los campos de velocidad, temperatura y salinidad que utiliza el modelo lagrangiano para estimar el transporte de patógenos entre centros de engorda. Además del

forzamiento superficial con las salidas de WRF, y según sea la solución requerida por el usuario final, ROMS recibe condiciones de borde desde bases de datos climatológicas, reanálisis de bases de datos, o a partir de las salidas de modelos operacionales que simulan todo el océano del planeta. Finalmente, Ichthyop utiliza los campos simulados por ROMS para mover las partículas virtuales que simulan patógenos y determinar la tasa a la cual se inactivan o desarrollan, según sea el caso. Las tasas de decaimiento, mortalidad o desarrollo pueden ser incorporadas como función de la temperatura y salinidad, mientras el comportamiento de las partículas (e.g. movimiento vertical) puede hacerse en función de esas mismas variables, de la hora del día o la edad de cada partícula. Con estas herramientas se realizaron experimentos numéricos diseñados de manera tal que permiten responder las interrogantes expresadas por los clientes, e.g. para la estimación de riesgo sanitario en una época del año o ante una contingencia sanitaria particular. Así, en un plazo de solo seis meses la empresa de I+D Ocean Applied Science Ltda. (OASC) desarrolló una metodología de simulación, la cual permitió al usuario decidir dónde realizar las primeras siembras tras la paralización de operaciones durante la crisis sanitaria del ISAv. Además, mostraron la influencia determinante del forzamiento atmosférico sobre la posición y extensión del área en riesgo, aspecto no considerado inicialmente por otros modelos.

A continuación, se describe, a modo de ejemplo, un caso real y reciente de estos experimentos numéricos realizados por OASC con la participación de investigadores del Centro i-mar de las Universidades de Los Lagos y de Concepción. Durante la primera semana del mes de abril de 2013 se detectó que dos centros de engorda de salmones eran sospechosos de presentar un brote de ISAv. El mismo día en que la Subsecretaría de Pesca notificó del hecho a las empresas con centros de engorda en la vecindad de los centros en contingencia, Friosur solicitó a OASC una estimación del riesgo de dispersión de los brotes a sus propios centros. Una semana después, la propia Subsecretaría de Pesca (por canales informales y en calidad de ayuda voluntaria, no remunerada) solicitó a OASC compartir los resultados de sus estimaciones de dispersión para contrastar los resultados del Instituto de Fomento Pesquero de Chile (Ifop). Diez días tras la primera notificación, OASC entregó sus simulaciones de dispersión, que básicamente establecían que ninguno de los centros de Friosur estaba en peligro de contagio directo por transporte de agua. No obstante, y en contraposición a la evaluación efectuada por Ifop (organismo que entrega información técnica oficial en el tema), las simulaciones de OASC mostraron que un centro perteneciente a otra compañía que se encontraba a 3 km de uno de los centros en contingencia estaba en riesgo inminente de contagio, el que tres semanas después dio positivo a ISAv patógeno (abajo a la izquierda en la Figura 3). Esto último sirvió de validación a la simulación. Por otro lado, los resultados mostraron halos de riesgo alrededor de los centros en contingencia muy

distintos uno de otro y, por cierto, muy diferentes a los halos de riesgo circulares decretados por el Servicio Nacional de Pesca. En un caso, el área en riesgo se extendía a más de 8 km del centro en contingencia, pero en ella no se encontraba ningún otro centro en operación. En el otro, el área en riesgo se extendía a menos de 5 km del centro en contingencia, y en ella se encontraba el centro que posteriormente se infectó; es notable que otro centro situado a 5 km del mismo centro en contingencia, pero fuera del área que la simulación mostró como riesgosa, no se contagió. Este tipo de experimentos de simulaciones numéricas basadas en información oceanográfica y atmosférica ha permitido generar otros productos además de la evaluación del riesgo sanitario por contagio de ISAv. Se ha utilizado la misma metodología para demostrar las limitaciones, relevantes para la industria, del uso de los límites de las Agrupaciones de Concesiones, como barreras sanitarias, y la reglamentación vigente. Usando la misma *suite* de modelos, OASC les propuso en 2011 a la Subsecretaría de Pesca y al Servicio Nacional de Pesca una metodología para definir halos de influencia significativa de centros clasificados como diseminadores del copépodo parásito *Caligus rogercresseyi* (Boxshall & Bravo). Aunque dichos organismos no financiaron ese trabajo, se encuentra actualmente en evaluación una propuesta para utilizar esta metodología en tres Agrupaciones de Concesiones. OASC ha generado simulaciones hidrodinámicas con una metodología similar para estimar la capacidad de carga de cultivos de mitílidos en el mar interior de Chiloé, y actualmente se encuentra en estudio la aplicación de la misma metodología para explorar la capacidad productiva en sitios de la Región de Aysén. Se está desarrollando acoplar la *suite* de modelos para alimentar estimaciones de capacidad productiva de centros de engorda de salmones. Por último, se ha utilizado este mismo tipo de simulaciones hidrodinámicas para estimar prospectivamente la potencia mareomotriz general de los canales australes entre Puerto Montt y Cabo de Hornos, servicio que fue solicitado por el Ministerio de Energía.

En términos económicos, esta actividad requiere un análisis que detalle diferentes aspectos. 50.000.000 de pesos se invirtieron finalmente en el desarrollo del servicio de simulación de la dispersión de ISAv, los que fueron aportados íntegramente por una sola empresa productora de salmones, Salmónes Friosur S. A. En el caso particular del ejemplo entregado en este trabajo, el desarrollo de OASC, con un costo de 50.000.000 de pesos, ha permitido ingresos por 60.000.000 de pesos en los últimos tres años. Resulta evidente que los beneficios económicos directos para OASC no han justificado el desarrollo de estas herramientas y lo hace ver como un fracaso relativo de la innovación en términos financieros. En el mercado internacional, el precio de estos mismos servicios es cinco veces superior al precio de OASC. Ello indica que aún la demanda en Chile no es lo suficientemente valorada como para comprar estos servicios a precio de mercado. Por ejemplo, una simulación hidrodinámica de 30 días en

un dominio típico de Aysén, de 30 x 30 km, a resolución de 150 m, tiene un precio en el mercado internacional de 32.000.000 de pesos, pero OASC se ha visto en la necesidad de venderlo en no más de 15.000.000 pesos y solo en una oportunidad. El resto de las cotizaciones, todas de mayor envergadura, no han superado los 12.000.000. El mercado, tanto público como privado en Chile, no ha llegado a valorar el producto a un nivel que no ponga en riesgo la viabilidad financiera de las organizaciones que lo desarrollan en Chile, lo cual constituye hoy día una fuerte limitación para incentivar nuevas actividades de innovación en este campo.

Los resultados alcanzados hasta la fecha muestran que el desarrollo de estos modelos de simulación otorga a las empresas que los utilizan mayor grado de conocimiento del ambiente físico y químico donde realizan las actividades de producción, lo que les permite reducir riesgos sanitarios y mejorar sus indicadores productivos. Más allá de los retornos financieros inmediatos, las empresas que están utilizando estas nuevas herramientas tienen retornos productivos concretos, lo que pone de manifiesto que el desarrollo de herramientas innovadoras, que tienen un componente científico importante, necesitan un tiempo para demostrar su utilidad antes de generar retornos económicos y transformarse en una herramienta real y masiva de desarrollo para este sector.

Aspectos institucionales que han influido en el ejemplo

Por otra parte, este ejemplo evidencia que, pese a las diferencias de intereses entre investigadores y empresarios, es posible generar instancias de trabajo coordinado cuando se logra llegar a acuerdos, objetivos y metas de interés común. Cuando el investigador visualiza un reto científico y la empresa avizora su aplicación se genera una sinergia que permite crear innovaciones. Para alcanzar estos acuerdos es necesario vencer diferencias de lenguaje, de los intereses de las empresas, universidades o institutos de investigación. El ejemplo que se entrega en este trabajo muestra que cuando un desafío posee un fuerte componente científico que lo hace atractivo para el investigador y tiene además repercusiones productivas directas, haciéndolo atractivo para la empresa, es posible generar acuerdos comunes que impulsen actividades innovadoras basadas en la generación de conocimiento. Tampoco hay que olvidar que para lograr estos objetivos también deben alinearse los intereses tanto de empresas como de centros de investigación o universidades, y para ello se requieren marcos de entendimiento y políticas estratégicas de desarrollo por ambas partes. Dado que son otros los conceptos y metas que marcan el éxito de las diferentes instituciones, los indicadores deben ser modificados de tal manera que no se disminuya el impacto de la innovación, pero, por otra parte, que se mantenga el interés del investigador. Por ejemplo, en estos casos, las instituciones de investigación tienen que internalizar que la “moneda de cambio” no son solo publicaciones científicas, y que ciertos descubrimientos y/o

conocimientos deben protegerse para incentivar a la empresa, a generar el deseo de apropiarse de este conocimiento. Se requiere entender en forma recíproca que las metas que las instituciones participantes tienen son diferentes, y al crear alianzas estratégicas se deben compartir los resultados para generar los incentivos.

El Centro i-mar de la Universidad de Los Lagos y el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción son las instituciones a las que pertenecen los investigadores involucrados en el desarrollo de la innovación. La preocupación de esas instituciones por mantener científicos que asocien sus capacidades en ciencia básica con aplicaciones es lo que, en primer lugar, ha hecho posible responder a la necesidad de desarrollo planteada por Salmones Friosur en el año 2009 y con ello permitir la creación de OASC. Este constituye un ejemplo de cooperación universidad-empresa donde luego de generarse las confianzas mutuas, permite instalar un espacio e institucionalidad en el que se establece el diálogo e interacción entre científicos y empresarios, marcado por metas productivas que se requieren modificar, corregir o mejorar para aumentar la productividad y dar sustentabilidad a la industria. Este ejemplo muestra también la necesidad de crear estructuras institucionales nuevas con indicadores de éxito diferentes para alcanzar las metas productivas que permitan abordar los temas de innovación con eficacia. El correr tras distintos intereses menoscaba el éxito de ambos actores; en la empresa se corre el riesgo de entremezclarlo con otros problemas productivos cotidianos, y en manos exclusivas del investigador tiende a profundizar en los métodos buscando resultados de un mayor impacto científico puro, pero que no necesariamente están alineados con la meta productiva. Ambos casos, si no van de la mano, marchan en detrimento de las exigencias y beneficios que aporta la innovación. Es por ello que los espacios de interacción que potencien el ambiente de interacción son tan necesarios. Es también importante resaltar que para tener éxito en estos emprendimientos de innovación se hace necesario tener estructuras flexibles capaces de adaptarse a los requerimientos que las circunstancias demandan, de otro modo no será posible llegar a acuerdos. Así es necesario crear al interior de las unidades de investigación sistemas que valoren la innovación y acuerden indicadores de éxito y que estén validados por todos los pares académicos. Estos indicadores deben ir más allá de publicaciones y patentes, y a modo de ejemplo hay que evaluar impactos económicos en empresas, cambios regulatorios u otros que den cuenta del impacto de la innovación. Por otra parte, el sector productivo debe comprender que las diferentes actividades de los investigadores, incluida la generación de artículos científicos, permiten mantener capacidades científicas actualizadas que respaldan la innovación basada en conocimiento. En este contexto, el presente ejemplo muestra como al crear estos espacios (OASC) no involucra a los investigadores en tareas que no apuntan a la innovación basada en conocimiento, y, por otra parte, permite operar

bajo reglas diferentes que rigen al desarrollo académicamente puro, genera un sistema de valorización de la innovación que permiten alcanzar estas metas.

Si bien ningún fondo del Estado participó en el financiamiento directo del proceso de desarrollo e innovación realizado por OASC, es necesario discutir sobre la participación de algunas entidades gubernamentales. Aunque al inicio se hubiera intentado postular a algún fondo de innovación, los plazos requeridos para postular a ellos no hubieran permitido que la adjudicación ocurriera antes de terminar el desarrollo, lo cual es una limitación para enfrentar procesos de innovación dinámicos. Por otra parte, en el año 2009, InnovaChile había financiado dos proyectos de interés público independientes que, por un costo agregado que superó el millón de dólares, desarrollarían, en un plazo de tres años, sistemas de simulación de la dispersión de patógenos entre centros de cultivo de salmones. Durante el primer semestre de 2012, ambos proyectos mostraron simulaciones de transporte de partículas lagrangianas para áreas más pequeñas que las simuladas por OASC, aunque sin considerar la magnitud de la excreción de partículas o la concentración mínima infectiva de virus para mostrar áreas de riesgo de contagio, como lo había hecho OASC a fines de 2009. Por otro lado, ambos proyectos simularon la hidrodinámica usando condiciones de borde y forzantes superficiales medidas *in situ*, lo que forzosamente obliga a realizar las mismas mediciones para cada período que se quiera simular. Se trata de la misma debilidad que en parte explicó el fracaso del proyecto de pronóstico oceanográfico que intentó implementar el Instituto Tecnológico del Salmón (Intesal) con financiamiento de InnovaChile (aproximadamente un millón de dólares) entre 2000 y 2006. El uso de modelos matemáticos como los mostrados en este ejemplo pueden producir resultados, pero con limitadas aplicaciones. Por ejemplo, Alvarez *et al.* (2011) utilizan un modelo numérico hidrodinámico para estudiar el potencial de dispersión de un molusco invasivo presente en una bahía de la costa de Argentina. No obstante, la inadecuada presentación de objetivos e hipótesis, así como los métodos y la validación del modelo, limitan sustancialmente las conclusiones del estudio (Sepúlveda & Olivares 2013). Esto nos lleva al tema de recursos humanos que trataremos a continuación.

El desarrollo del tipo de innovaciones basadas en conocimiento requieren de personal con formación avanzada para enfrentar con éxito estas demandas. Todo usuario de un sistema de simulación hidrodinámico debe tener habilidades avanzadas en el área de informática. Debe ser capaz de, al menos, entender la administración de sistemas de cómputo de alto desempeño, muy probablemente sistemas Linux, con decenas de procesadores trabajando en paralelo. Debe poder manejar un lenguaje de programación de tareas ligadas al uso de bases de datos geofísicos, la preparación de esa información en formato útil para el sistema de simulación, el manejo adecuado de las salidas del mismo y su análisis (e. g. Python,

Matlab, IDL, R). Todos los sistemas de simulación hidrodinámica tienen decenas de parámetros, asociados a procesos físicos que definen de manera crítica su habilidad para reproducir la circulación marina. Es necesario un conocimiento acabado de la geofísica en el que se funda cada uno de esos procesos para poder manejar con propiedad sistemas como esos. Normalmente, la dispersión de patógenos se simula con sistemas distintos al sistema que simula la circulación marina, con la capacidad de integrar varios procesos biológicos importantes para el proceso de transporte. Es necesario conocer esos procesos biológicos para manejar con éxito esos sistemas. Ninguna de estas habilidades se adquieren en un programa de pregrado que se imparta en Chile, aunque en la carrera de Geofísica de la Universidad de Concepción se dan cursos introductorios de simulación hidrodinámica. La serie de habilidades descritas se desarrollan con años de práctica guiada por equipos humanos trabajando en un laboratorio dedicado específicamente a esta tarea. De hecho, todos los usuarios actuales de sistemas de simulación de este tipo tienen formación de posgrado, y la mayor parte de ellos, de doctorado. Todo lo anterior determina que el número de personas capaces de utilizar con éxito los sistemas de simulación requeridos para estimar la dispersión de patógenos entre centros de cultivo por parte de las corrientes es extremadamente limitado. En 2009, en Chile existían tres personas con experiencia en el sistema de simulación hidrodinámica ROMS, todos ligados al Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción. En la misma época, los usuarios nacionales del sistema de Modelamiento Hidrodinámico (MOHID) llegaban probablemente a cuatro, todos ligados al laboratorio del Dr. Víctor Marín, de la Universidad de Chile. En el caso del sistema de simulación hidrodinámica Finite-Volume Ocean Coastal Model (FVCOM), solo era manejado por dos personas, una en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción y un consultor independiente. Finalmente, el sistema de Modelamiento Hidrodinámico Tridimensional (MIKE3), pese a haber sido utilizado en el sistema de pronóstico implementado por Intesal, solo tenía dos usuarios conocidos por haberlo aplicado en Chile. Estos números señalan claramente una enorme debilidad del sistema de I+D+i en Chile; el recurso humano calificado es una limitación en muchas áreas disciplinares necesarias para generar las capacidades que requiere una industria de acuicultura que sea sustentable.

A pesar de que tanto los métodos como los resultados de su aplicación han sido mostrados en foros empresariales y científicos y directamente a altos funcionarios de Subpesca y Sernapesca, la comercialización de esos servicios de simulación fuera de Friosur está aún en una fase de consolidación económica. La razón estriba en que las empresas consideran que disponer de esta metodología corresponde a las obligaciones del Estado o de SalmonChile. Subpesca consideró que información tan delicada, como la necesaria para normar, debía ser generada por Instituto de Fomento Pesquero (Ifop), institución que no había trabajado en ello.

Esta experiencia permite mostrar algunas de las brechas y dificultades existentes para desarrollar innovación en acuicultura que aún deben resolverse.

Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se concluye que la industria de la acuicultura ha sido capaz de adaptarse a las demandas del mercado generando innumerables innovaciones, tanto en sus sistemas de producción como en sus modelos de negocios. No obstante, son aún escasos los casos de éxito de innovación basada en creación de conocimiento. Son pocos los ejemplos de cómo se llegó a productos exitosos que requirieron un desarrollo basado en conocimiento científico y que hoy están instalados en el mercado o al menos tienen una trascendencia generalizada y reconocida por gran parte del sector. A pesar de ello, cuando se construyen modelos de interacción suficientemente flexibles, que acomoden los distintos intereses científicos y productivos, es posible vencer las diferentes barreras y generar productos como el modelo de dispersión del ISAv, basado en simulación numérica del océano y la atmósfera, que se presenta en este trabajo. Es importante definir la función del Estado y la de los particulares en el manejo sustentable de un bien común como son las masas de agua, dado que hoy lo reconocemos como un elemento central para el control de patógenos y parásitos. Así expuesto, la innovación en acuicultura está encontrando arraigo en el sector acuícola en Chile, pero el camino parece requerir aún de cambios en su forma de operar, de la estructura de sustento que ella necesita y, finalmente, de un mayor nivel de inversión pública y privada.

Así, los principales aspectos que se identifican como muy importantes en el éxito o fracaso del caso de estudio son:

1. La creación de un espacio propio para la innovación (OASC) donde converjan los intereses de los investigadores y de los empresarios. Fue vital para el éxito técnico de este proyecto, evitando que otras metas productivas y actividades académicas que no apuntan a la innovación interfieran.
2. La generación de confianza mutua entre la empresa y la universidad, comprendiendo que se requería generar un lenguaje y espacio común de trabajo.
3. Es necesario crear sistemas demostrativos concretos para poder convencer a potenciales usuarios de los beneficios que el producto tiene. Estos sistemas requieren de recursos e infraestructura que no siempre están disponibles.
4. Se debe generar una mayor capacidad de trabajo conjunto entre el sector público y el privado. Hoy se perciben con funciones opuestas y las sinergias no se han podido inducir, introduciendo interrogantes en el uso de estas herramientas por el sector privado.

El presente trabajo también permitió distinguir elementos que tienen que modificar, o incluso crear, para que la innovación basada en conocimiento sea una herramienta de desarrollo tangible para la acuicultura que en muchos de los casos en los que se requiere no necesariamente está disponible en el extranjero debido a las particularidades ambientales de nuestros sistemas costeros y a que las especies en cultivo son nativas. Los patógenos tampoco están en otras regiones y, por lo tanto, el conocimiento que de ellos tenemos no existe. Dentro de este contexto, es posible realizar las siguientes recomendaciones:

1. Es necesario aumentar las capacidades científicas en Chile que son insuficientes en relación con el tamaño actual de la industria. Hay que refocalizar y coordinar a los grupos existentes para incrementar su eficacia en el uso de los recursos económicos destinados a resolver los problemas reales que enfrenta hoy el sector acuícola. Se debe mejorar el impacto científico en acuicultura aumentando el tamaño y calidad de la comunidad científica del país.
2. Existe consenso en el sector en que hay que crear una estructura de I+D+i capaz de dar el respaldo tecnológico y mejorar la capacidad de innovación que esta actividad productiva requiere en Chile. La constitución y estructura interna de esta entidad de I+D+i es discutible, pero cualquiera sea su formato es necesario coordinar las capacidades existentes y asegurar la incorporación de capital humano avanzado en un marco que apoye el desarrollo sustentable de la actividad.
3. Parece que se requiere mejorar los mecanismos de asignación de recursos para que la innovación basada en conocimiento adquiera una relevancia relativa al nivel productivo alcanzado. Se detectaron innumerables problemas que no parece posible que sean abordables por una empresa en particular y se necesita de fondos y mecanismos de coordinación. El ejemplo analizado indica en forma categórica que hay formas mucho más efectivas en el uso de los recursos que la institucionalidad tradicional que hoy existe.

Literatura citada

- ÁLVAREZ, L. I., CUADRADO, D. G. y PERILLO, G. M. E. (2011). Aplicación de un modelo de trazadores lagrangianos en Bahía Anegada, Argentina. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 46,199-206.
- BUSCHMANN, A. H., CABELLO, F., YOUNG, K., CARVAJAL, J., VARELA, D. A. y HENRÍQUEZ, L. (2009). Salmon aquaculture and coastal ecosystem health in Chile: Analysis of regulations, environmental impacts and bioremediation systems. *Coastal and Ocean Management*, 52, 243-249.
- BUSCHMANN, A. H., STEAD, R. A., HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, M. C., PEREDA, SV., PAREDES, J. E. y MALDONADO, M. A. (2013). Un análisis crítico sobre el uso de macroalgas como base para una acuicultura sustentable. *Revista Chilena de Historia Natural*, 86, 251-264.

- CASTILLA, J. C., FERNÁNDEZ, M., ACUÑA, E., BAHAMONDE, N., BUSCHMANN, A. H., NAVARRETE, S., ULLOA, O. y YÁÑEZ, E. (2006). Ciencias del Mar. En: J. E. Allende, J. Babul, S. Martínez & T. Ureta (Eds.), *Análisis y Proyecciones de la Ciencia Chilena 2005* (pp. 375-402). Santiago, Chile: GráficosAndes.
- DAVY, F. B., SOTO, D., BHAT, V., UMESH, N. R., YUCEL-GIER, G., HOUGH, C. A. M., DERUN, Y., INFANTE, R., INGRAM, B., PHOUNG, N. T., WILKINSON, S. y DE SILVA, S. S. (2012). Investing in knowledge, communications and training/extension for responsible aquaculture. En: R.P. SUBASINGHE, J.R. ARTHUR, D.M. BARTLEY, S.S. DE SILVA, M. HALWART, N. HISHAMUNDA, C. V. MOHAN y P. SORGELOOS (Eds.), *Farming the Waters for People and Food. Proceedings of the Global Conference on Aquaculture 2010, Phuket, Thailand* (pp. 569-625). Rome and NACA, Bangkok: FAO.
- DUARTE, C. M., MARBÁ, N. y HOLMER, M. (2007). Rapid domestication of marine species. *Science*, 316, 382-383.
- GODOY, M. C., AEDO, A., KIBENGE, M. J. T., GROMA, D. B., YASON, C. V., GROTHUSEN, H., LISPERGUER, A., CALBUCURA, M., AVENDAÑO, F., IMILÁN, M., JARPA, M. y KIBENGE, F. S. B. (2008). First detection, isolation and molecular characterization of infectious salmon anaemia virus associated with clinical disease in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Chile. *BMC Veterinary Research* 4:28pp. (online) URL: <http://www.biomedcentral.com/1746-6148/4/28>
- LETT C., VERLEY P., MULLON C., PARADA C., BROCIER T., PENVEN P., BLANKE B. (2008). A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics. *Environmental Modelling & Software*, 23, 1210-1214.
- MEDINA, M. H. (2009). En salmonicultura, la I+D retoma su camino. *Aqua* (marzo) (Chile), 122-125.
- SEPÚLVEDA, H. H. y OLIVARES, G. (2013). Comentarios a "Aplicación de un modelo de trazadores lagrangianos en Bahía Anegada, Argentina", de Álvarez *et al.* (2011). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 48, 199-201.
- SERNAPESCA (2013). *Anuarios Estadística de Pesca*, Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura, Valparaíso, Chile. URL: http://www.sernapesca.cl/index.php?option=com_remository&Itemid=54&func=select&id=2 (acceso julio 2013).
- WK (2013) WEB OF KNOWLEDGE. Thomson Reuters, Nueva York. USA. URL: <http://apps.webofknowledge.com>.

Figuras

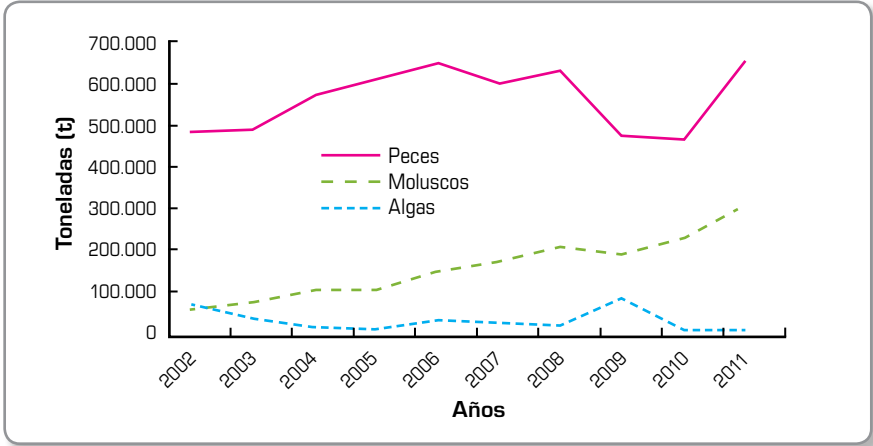


Figura 1. Evolución de la producción (toneladas) por acuicultura de peces, moluscos y algas durante la última década en Chile. Fuente: Sernapesca (2013).

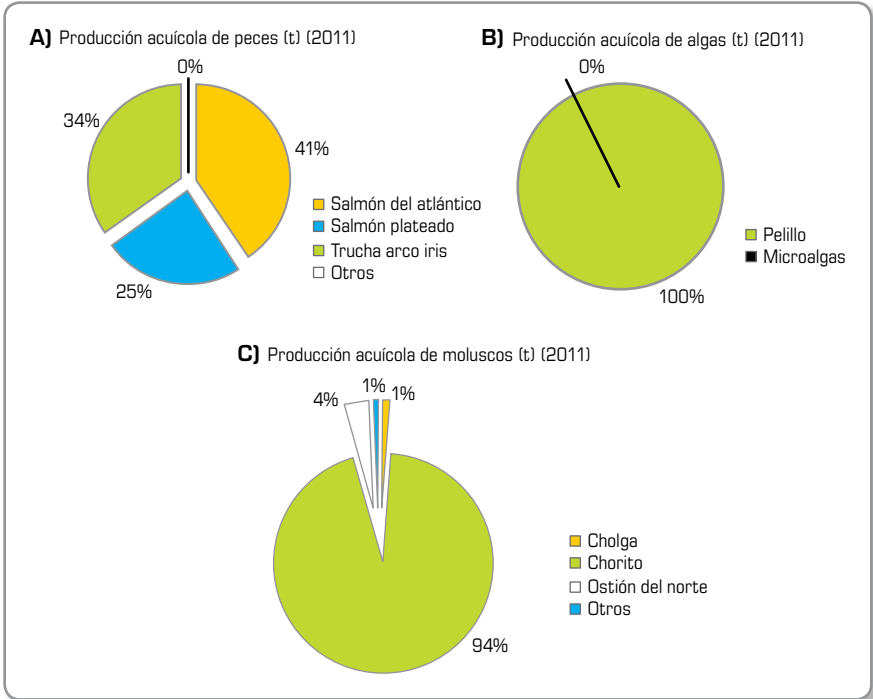


Figura 2. Producción relativa (%) de diferentes especies de peces (A), algas (B) moluscos (C) en el año 2011 en Chile. Fuente: Sernapesca (2013).

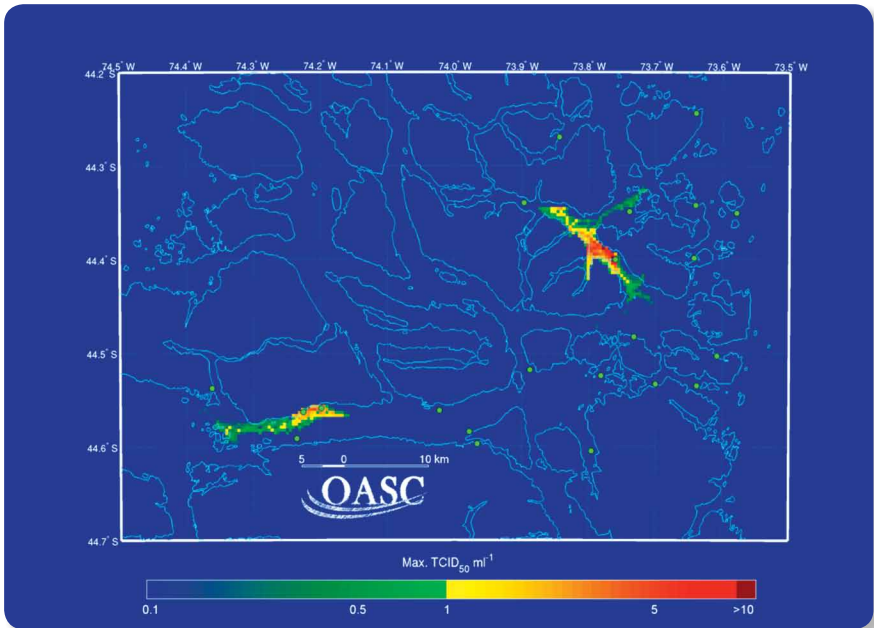


Figura 3. Concentración máxima de virus ISA excretado desde los centros en contingencia sanitaria durante abril 2013 en dos agrupaciones de concesiones. Los puntos verdes indican centros de producción de salmónes. Las áreas en verde muestran una concentración que no es infecciosa, mientras las áreas que van del amarillo al rojo muestran probabilidades crecientes de infección. Concentraciones mayores a 10 TCID₅₀ ml⁻¹ implican una infección cierta. Resultados obtenidos con una simulación numérica usando la suite WRF-ROMS-Ichthyop.

Información técnica del proyecto

Modelo de dispersión del virus ISA (ISAv) basado en simulación numérica del océano y la atmósfera: alcances y desafíos.

Financiamiento	Fuentes	Aportes privados: (venta servicio) IFOP INPESCA Friosur UACH Públicas: MINECON
	Montos	\$ 63.000.000
Tiempo involucrado (desde la idea a la innovación)	El tiempo involucrado desde el primer acercamiento entre la industria hasta dar comienzo al primer proyecto de modelamiento fueron de 4 meses. Desde ese momento hasta obtener el primer producto pasaron otros 6 meses. Luego de 1 año posterior al desarrollo del modelo se obtuvieron datos empíricos de infecciones para poder calibrar el método y revisar su capacidad de predicción.	
Patentes o registros de protección industrial La protección está dada por la capacidad de manejo de software abierto.	Solicitudes (n° de solicitudes)	Nacionales: No hay
		Internacionales: No hay
	Concesiones (n° de Patentes)	Nacionales: No hay
		Internacionales: No hay
Investigadores/gestores	Indicar número de personas involucradas en el proyecto 3	
Industria que adoptó la innovación	Salmones Friosur SA	
Inversión en la innovación	Indicar montos de dinero que la(s) empresa(s) ha(n) comprometido para financiar otros proyectos. Salmones Friosur SA invirtió \$ 30.000.000 para iniciar el trabajo de OASC Ltda. A la fecha no hay nuevas inversiones, pero OASC Ltda. ha sido capaz de levantar fondos de Innova Corfo por \$ 18.000.000. Indicar si la(s) empresa(s) tiene(n) disposición para financiar nuevos proyectos relacionados con la innovación. Han manifestado su disposición desde el año 2009, pero hasta ahora no se ha hecho efectivo.	

ÁREA AGROPECUARIA Y ALIMENTOS

Sector agropecuario y de alimentos

Álvaro Peña N. (Coordinador),
Facultad de Ciencias Agronómicas.
Departamento de Agroindustria y Enología. Universidad de Chile.

Claudio Pastenes V.,
Facultad de Ciencias Agronómicas.
Departamento de Producción Agrícola. Universidad de Chile.

Rodrigo Infante E.,
Facultad de Ciencias Agronómicas.
Departamento de Producción Agrícola. Universidad de Chile.

Roberto Neira R.,
Facultad de Ciencias Agronómicas.
Departamento de Producción Animal. Universidad de Chile.

Ignacio del Río G.,
San José Farms S. A.

Jorge Lazcano C.,
Nestlé Chile S. A.

Sebastián Monckeberg V.,
Vilkun S. A.

Resumen

Chile ocupa el lugar 17 en el valor exportado de alimentos, de un universo de más de 200 países. El sector de alimentos es el segundo en generación de divisas, crece a razón de US\$ 1.000 millones por año, y ha duplicado el valor de sus exportaciones en 10 años. En términos de valor de la producción, el país se ha ubicado entre los principales veinte productores mundiales de frutas y hortalizas y el quinto exportador mundial de vinos.

Las innovaciones en el sector agropecuario y de alimentos pueden ser definidas como todos aquellos nuevos conocimientos y tecnologías que se dan en las fases de producción, procesamiento y comercialización y que son aplicados a los procesos económicos y sociales. Mayoritariamente en Chile, la innovación en este sector ha tenido como factores estimulantes la capacidad emprendedora del sector privado, la rápida adaptación de tecnologías importadas y profesionales universitarios de buen nivel. Entre las limitantes se cuentan el financiamiento y la casi nula existencia de departamentos de I+D+i en el sector privado, dependiendo, por lo mismo, de la importación y adaptación de innovaciones tecnológicas generadas en el extranjero a las condiciones locales y la baja conexión entre centros de innovación (públicos) y el sector privado. No obstante el actual desarrollo del sector, la generación de innovaciones locales ha sido escasa. Un ejemplo de trabajo conjunto entre asociaciones de productores, centros de investigación, universidades y empresas de proveedores para realizar acciones de innovación en el sector agropecuario y de alimentos han sido los consorcios tecnológicos para la innovación. Esta iniciativa fue impulsada desde el año 2004 por Conicyt con el aporte del Banco Mundial, la Corfo y FIA. Inicialmente se crearon once consorcios con recursos públicos de aproximadamente 25 mil millones de pesos (\$2.200 millones promedio/consorcio). En el sector agropecuario y de alimentos destacan los Consorcios Lechero, del Vino VINNOVA-TECNOVID, de la Fruta, de Biofrutales, Ovino, de la Papa y Tecnológico Apícola para el Mercado Global, todos sociedades anónimas.

El caso de estudio que se presenta corresponde a uno de los 21 proyectos desarrollados inicialmente en el marco de la iniciativa público-privada Consorcio Tecnológico del Vino VINNOVA-TECNOVID S. A. financiada por Innova-Corfo, proyecto individual por un monto de \$104.150.622, denominado “Maduración de bayas: metabolismo primario y secundario en relación con componentes determinantes en la producción de vinos finos y su modulación por luz y riego (05CTE02-07) [2006-2010]”, el cual tuvo su base en el Proyecto Fondecyt 1020151 (2002-2005) “Consideraciones fisiológicas en el manejo agronómico de la vid para la obtención de vinos de alta calidad en Cabernet sauvignon y Syrah en el valle del Maipo” con un financiamiento aproximado de \$75.000.000. La innovación asociada a la ejecución de este proyecto permitió aumentar el rendimiento por hectárea de viñedo entre 30% y 40%, con uvas de la misma calidad para la elaboración de vinos finos. Este fue un paquete tecnológico de bien público de uso general que han aplicado, por ejemplo, viñas grandes y *boutique* como Santa Rita y Haras de Pirque, respectivamente, beneficiando al sector productor de vinos finos en Chile al cambiar el paradigma de que un menor rendimiento producto del raleo de bayas generaba necesariamente uvas para la producción de vinos de mayor calidad. Además, se introdujeron cambios de manejo en el riego de los viñedos, los que al encontrarse en una mejor condición fisiológica

al momento de la cosecha, aumentan gradualmente su sustentabilidad. Parte de estos resultados se plasmaron en publicaciones ISI, como Low Molecular Weight Phenolic and Anthocyanin Composition of Grape Skins from cv. Syrah (*Vitis vinifera* L.) in the Maipo Valley (Chile): Effect of Clusters Thinning and Vineyard Yield, Food Science and Technology International. 2007, 13: 153-158, de los autores A. Peña-Neira, A. Cáceres, and C. Pastenes.

PARTE I: Aspectos generales, nacionales e internacionales acerca de la innovación en el área agropecuaria y de alimentos

El país y el sector agropecuario y de alimentos, en particular, están insertos en un nuevo escenario cambiante, competitivo y en una aceleración sin precedente. Es por esto que la innovación es una estrategia fundamental para lograr objetivos económicos, sociales y ambientales. Muchos países están intentando reformar y evolucionar sus programas de apoyo a la innovación con el fin de desarrollar capacidades flexibles y pertinentes para lograr esos objetivos (Klerkx *et al.*, 2009). Esto es de particular urgencia en los países en vías de desarrollo como Chile, porque el sector agropecuario y de alimentos sigue siendo un elemento fundamental de sus economías, y la innovación es la clave para el crecimiento agrícola sustentable necesario para reducir la pobreza (Thomas y Slater, 2006).

La innovación en agricultura y alimentación puede ser definida como todos aquellos conocimientos y tecnologías que se incorporan como una nueva función de producción, procesamiento y comercialización, y que son aplicados a los procesos económicos y sociales. Como resultado de tales innovaciones, los productores, procesadores y comercializadores se tornan más competitivos, producen o venden productos de mejor calidad o más novedosos, y generan mayores ganancias. La innovación en la agricultura está relacionada con variedades o razas mejoradas, tejidos, vacunas, equipos y técnicas de cultivo y crianza, entre otros. También incluye la aplicación de protocolos de calidad, reestructuraciones organizacionales, mejoras gerenciales y acceso a nuevos mercados y productos. Las innovaciones pueden conducir a una mejora en la gestión de los recursos naturales y otros, y a generar, en última instancia, beneficios para toda la sociedad.

Un enfoque sistémico reconoce que la innovación agrícola no trata solamente de adoptar nuevas tecnologías, sino que también requiere de un equilibrio entre nuevas prácticas técnicas y formas de organización alternativas, por ejemplo, mercados, tenencia de la tierra y distribución de los beneficios (Dormon *et al.*, 2007; Adjei-Nsiah *et al.*, 2008).

En relación con el posicionamiento del área silvoagropecuaria y de alimentos en el ámbito nacional o internacional, es posible señalar que

la economía chilena se sustenta en cinco grandes grupos de actividades, que son: la minería; el sector silvoagropecuario; la pesca; la industria, comercio, transporte, y servicios varios (Figuras 1 y 2).

En términos de valor de la producción, el país se ha ubicado entre los principales veinte productores mundiales de frutas y hortalizas (FAO, 2010), quinto exportador mundial de vinos (OIV, 2012), segundo productor mundial de salmónidos (FAO, 2012) y décimo productor en el mundo en acuicultura (FAO, 2010), entre otros rubros de importancia.

El sector de alimentos es el segundo en generación de divisas y crece a razón de US\$ 1.000 millones por año, habiendo duplicado el valor de sus exportaciones en 10 años. Chile aparece en el lugar 17º en el valor exportado de alimentos, de un universo de más de 200 países, siendo significativo su aporte al total de las exportaciones del país. Pocas naciones presentan una relevancia tal en su producto interno bruto del sector alimentario como el caso de Chile. A nivel mundial, solo Nueva Zelanda (con gran desarrollo de imagen como país productor de alimentos) y Bélgica lo superan (Fuente: FAO en www.chilealimentos.com).

En el sector agropecuario y de alimentos aparecen nuevas oportunidades de participación en la medida de que tengamos la capacidad técnica de responder a ellas. Ejemplos de esto son productos orientados a evitar el aumento de la obesidad y diabetes; la mayor demanda de proteínas de buena calidad; incremento sustantivo de la población de tercera edad, entre otras. Por otra parte, nuestro sector agropecuario y de alimentos se está viendo amenazado por la aparición de nuevos actores a nivel internacional. Vale mencionar ejemplos como los espárragos en Perú, donde alguna vez fuimos relevantes, sumando a esto uvas, paltos, arándanos, entre otros (en muchos casos con inversión chilena). Siguiendo con el ejemplo peruano, ese país cuenta con mejores condiciones agroclimáticas y con profesionales competitivos tanto en áreas productivas como comerciales y menores costos energéticos. La oportunidad está efectivamente en la capacidad que tengamos en generar innovación como instrumento de desarrollo de valor. Se debe hacer hincapié en que la innovación por sí misma no será una solución de largo plazo, pero sí lo será si genera conocimiento de calidad (I+D). Es aquí donde se forma el círculo virtuoso en que se puede marcar una ventaja significativa que se debe cimentar.

Coincidiendo con lo señalado por Pomareda & Hartwich (2006), Hartwich, & Tola (2007), Nelson (2007), Röling, N. (2009) y www.fia.cl, es posible observar que la situación actual de desarrollo de la innovación en el sector agropecuario y de alimentos es:

Sector público: Tradicionalmente en Chile se encomendó la responsabilidad de generar el conocimiento y las tecnologías agrícolas al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) con sedes a lo largo del país. A través de los años, estos institutos regionales han producido conocimientos y tecnologías valiosas, en particular en lo referente a la

creación de algunas variedades de plantas (trigo, papa), pero con poco impacto en generación de conocimiento en otras áreas y en transferencia del conocimiento al sector privado.

Universidades: Tradicionalmente, las universidades han sido instituciones de enseñanza con una cultura académica; pocas se han involucrado en innovación, investigación y servicios reales a la comunidad, y aún menos han llegado a ser centros de excelencia en el área agropecuaria y de alimentos. Las razones para esto incluyen falta de capital humano avanzado en un número y áreas que permita hacer, además de docencia, investigación y extensión; una mala gestión; falta de claridad en las prioridades; fallas en las reformas y falta de financiamiento público y privado. Sin embargo, algunas universidades han intentado contribuir al desarrollo del sector agropecuario y de alimentos a través de la investigación básica y aplicada con impacto en sistemas productivos, con acciones de transferencia tecnológica y aplicación a las comunidades locales con éxito disímil. No obstante las universidades no tienen como fin último conducir investigación orientada al desarrollo, la labor de profesores y departamentos ha sido incentivada a partir de la creación de fondos concursables de carácter aplicado (por ejemplo, Fondef, Innova), lo que permite una mayor coordinación con las necesidades de los productores o del sector agropecuario y de alimentos, existiendo, sin embargo, áreas poco desarrolladas. Por ejemplo, siendo Chile uno de los principales exportadores frutícolas del hemisferio sur y considerando la lejanía de los mercados que demandan nuestros productos, existen muy pocos desarrollos relevantes a nivel nacional y mundial en I+D+i en un tema de vital importancia, como la poscosecha de frutas, generado en centros universitarios chilenos. En conclusión, las universidades públicas y semipúblicas, que son un recurso potencial significativo para la innovación agropecuaria y de alimentos, por lo general han subutilizado en ocasiones su capacidad de contribución a tales fines.

Organizaciones de productores: No obstante estas organizaciones (cooperativas de lácteos, de vinos o pisqueras; organizaciones de productores y exportadores de fruta fresca como Asoex y Fedefruta; los productores y exportadores de vino asociados en Vinos de Chile; Asociación de Empresas de Alimentos de Chile, ChileAlimentos, ChileOliva, etc.) han sido activas en la implementación de tecnologías que han permitido innovación en diversos rubros (frutícola, olivícola, hortícola, avícola, porcino, etc.), la mayoría de ellas han sido poco visionarias en establecer sus propias divisiones o instalaciones de I+D+i, no contando con capital humano avanzado capaz de ser una contraparte efectiva de investigadores de centros de investigación agropecuaria y de las universidades, que permitan realmente canalizar las necesidades del sector productivo en resultados innovadores y facilitar la transferencia. Los productores que hacen innovación compran habitualmente las tecnologías y el *knowhow* en el extranjero y los aplican, no realizando I+D propia. Por este mismo

motivo, la poca I+D nacional desarrollada fundamentalmente en INIA y universidades no siempre es transferida y utilizada.

Muchas empresas no entienden los beneficios de la innovación y miran los instrumentos de financiamiento público como una forma de mejorar sus instalaciones productivas o de control de calidad de procesos y productos, pero no del área de la innovación. Por lo antes expuesto, la respuesta generalizada de las organizaciones de productores a las demandas tecnológicas es lenta e insuficiente. Muchas continúan dependiendo de los subsidios estatales e invierten muy poco en innovación tecnológica. El financiamiento de acciones de I+D+i por parte del sector privado es escaso, a diferencia de lo que se observa, por ejemplo, en el sector vitivinícola australiano, donde por ley se establece el pago obligatorio de impuestos de los productores de vino y uva, lo que permite el financiamiento de la administración y programas de las organizaciones como la Australian Wine and Brandy Corporation (AWBC) y la Grape and Wine Research Development Corporation (GWRDC). De esta forma, los productores de uva pagan €1,2 por tonelada de uva y las bodegas aportan €1,8 por tonelada de uva elaborada. Además, el gobierno de ese país contribuye con una cantidad equivalente a la recaudada por la industria con los impuestos establecidos para investigación, con un tope de 0,5 % del valor bruto de la producción (GDP). Actualmente, la industria de vinos australiana invierte 0,3 % del GDP, por tanto cuenta con un fuerte estímulo para aumentar la inversión en I+D+i. Esto tal vez cambie en Chile con la Ley al Incentivo Tributario en acciones de I+D+i recientemente promulgada, pero aún no se observa de forma clara.

Proveedores privados de conocimientos y tecnologías: Los productos provistos por el sector privado incluyen equipos agroquímicos y biofertilizantes, entre algunos otros. Entre los servicios se cuentan, por su parte, sistemas de control de calidad, análisis (físicos, químicos, microbiológicos), certificación para la exportación y almacenamiento bajo condiciones controladas. Se puede distinguir entre generadores privados de innovación y vendedores privados de innovaciones creadas en el extranjero. La brecha abierta por la insuficiente provisión pública y privada de innovaciones ha allanado el camino para que el sector privado copie e importe tecnologías foráneas, incluyendo semillas, agroquímicos y equipamiento en gran parte del sector agropecuario y de alimentos de Chile. Esto el sector privado lo ve como una ventaja, pero en muchas ocasiones las tecnologías foráneas han resultado poco aplicables a la realidad nacional, no permitiendo tampoco el desarrollo y patentamiento de innovaciones nacionales, o bien, como es cada vez más frecuente, requieren el pago de *royalties* a quienes han desarrollado las tecnologías/variedades en el extranjero, lo que puede ser una limitante al desarrollo y comercialización de productos elaborados en Chile.

Productores y pequeños procesadores: Los productores y las pequeñas empresas procesadoras copian de otros, mejoran sus negocios a base

de prueba y error, o desarrollan soluciones sin apoyo externo. Usualmente, estas iniciativas son incapaces de reunir una masa crítica de capacidad innovadora y de recursos.

Proveedores de insumos agrícolas y agroindustriales: Los insumos para la producción y el procesamiento agrícola —ya se trate de semillas, fertilizantes, plaguicidas, maquinaria, etc.— son abastecidos usualmente por las empresas nacionales o, en mayor medida, multinacionales con representantes locales. Para vender su producto, estas empresas diseminan conocimiento sobre el uso apropiado de las tecnologías, e incluso crean campañas de mercadeo que promueven paquetes tecnológicos más amplios. Por ejemplo, el paquete de “cero labranza” fue promovido por la empresa de agroquímicos fabricante del herbicida que se requería aplicar antes de sembrar las semillas. Algunas empresas de agronegocios han establecido sus propios departamentos de Investigación y Desarrollo (I+D), aún básicos, que realizan transferencias de tecnologías importadas y evaluadas en ensayos locales como innovación, pero con poco impacto; otras mejoran productos y procesos de manera informal. El potencial de innovación de tales empresas es sustancial.

Generación de conocimiento y tecnología del sector privado: Cuando la empresa privada desea innovar, sus opciones incluyen el establecimiento de su propio departamento interno de I+D+i (casi nulo en el sector agropecuario y de alimentos) y la necesaria contratación de técnicos y especialistas; la contratación de proveedores de conocimientos y servicios tecnológicos; la copia de tecnología usada por otros, y el establecimiento de alianzas con proveedores de servicios de conocimiento y tecnología.

Puentes Industria-Centros de conocimiento: Los centros de excelencia se están comenzando a formar y son una buena iniciativa para unir las oportunidades en los desarrollos de las universidades y la problemática de la industria. Wageningen UR Chile es un buen ejemplo de ello. Otro ejemplo de trabajo colaborativo entre asociaciones de productores, centros de investigación y universidades y empresas de proveedores para realizar acciones de innovación en el sector agropecuario y de alimentos han sido los consorcios tecnológicos para la innovación. Esta iniciativa, enmarcada en el Programa Bicentenario de Ciencia y Tecnología (PBCT), impulsada desde el año 2004 por Conicyt con el aporte de fondos del Banco Mundial, la Corfo y FIA, tiene como objetivo fomentar el desarrollo de consorcios que generen valor a partir del alineamiento de necesidades de mercado con conocimiento tecnológico mediante proyectos de I+D+i de largo plazo que tengan aplicabilidad e impacto relevante en el mercado. Inicialmente, se crearon once consorcios con un aporte público de aproximadamente 25 mil millones de pesos (\$2.200 millones promedio/consorcio). Las propuestas debían tener aplicabilidad e impacto relevante en el mercado, financiando actividades de innovación empresarial que permitan generar líneas de investigación científico-tecnológica de mediano y largo plazo, conducentes al desarrollo de proyectos que ten-

gan impacto en el mercado. En el sector agropecuario y de alimentos destacan el Consorcio Lechero (integrado por representantes de Fedeleche, la industria, entidades tecnológicas y empresas de servicio); Consorcio del Vino Vinnova-Tecnovid (integrado por representantes de Vinos de Chile, entidades tecnológicas universitarias y empresas de servicio), el Consorcio Tecnológico de la Fruta S. A. (constituido por la Asociación de Exportadores de Chile A. G. (Asoex), entidades tecnológicas y 26 empresas productoras y exportadoras de fruta), además del Consorcio Biofrutales S. A.; Consorcio Ovino S. A.; Consorcio de la Papa S. A. y Consorcio Tecnológico Apícola para el Mercado Global S. A. Estas iniciativas, no obstante su potencial impacto en el corto, mediano y largo plazo, a poco tiempo de su ejecución (seis años) han mostrado un bajo desempeño en materias de innovación tecnológica, señalado en el estudio realizado por Álvarez *et al.*, (2012).

En la actualidad, en algunos consorcios las fuentes de financiamiento (por ejemplo, Corfo) han optado por dejar la administración de los recursos públicos a las gerencias de las sociedades anónimas formadas inicialmente, donde los representantes del sector privado tienen un porcentaje mayoritario en los directorios, decidiendo estos los temas de I+D+i que desean que se financien, y no contando en su organigrama con personal científico contratado, que esté dedicado ciento por ciento a la investigación, y que contribuya a definir las mejores iniciativas que se deben financiar, como sí ocurre en otras empresas extranjeras de investigación que han servido de modelo a los consorcios chilenos, como es el caso del Australian Wine Research Institute.

En relación con la propensión a la innovación en el país, a causa de un insuficiente acceso al capital o de una mala percepción de las oportunidades que surgen de la innovación, los productores y las empresas del sector privado invierten menos en innovación de lo que resulta óptimo a nivel individual y social. Como resultado, los gobiernos y agencias de desarrollo han suplementado los esfuerzos de innovación privada no solo mediante la provisión de fondos, sino también a través del establecimiento y desarrollo de capacidades de investigación en instituciones públicas dedicadas a esta actividad. Esto aún dista de los modelos que se aprecian en los países desarrollados como Australia, Alemania y Estados Unidos.

Dentro de los factores que estimulan acciones de I+D+i se encuentran los instrumentos de financiamiento, que complementan lo ya señalado sobre los consorcios tecnológicos. La Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (Conicyt) administra los instrumentos de financiamiento de los programas Fondecyt, Fondap, PIA y Fondef, que representaron en el año 2012 cerca del 85 % de los fondos concursables, alcanzando un desembolso anual aproximado de unos USD 220 millones. En el caso de Fondecyt Regular, el año 2011, en las disciplinas asociadas a las ciencias agrícolas, la tasa de adjudicación en relación con el

número de proyectos postulados en el área fue de 44 % (35 proyectos sobre un total de 84), con un aporte de \$4.487.898.000. Para Fondef, considerando todos los concursos de investigación y desarrollo del programa, solo como ejemplo en el año 2010, la tasa de adjudicación del área ciencias agrícolas fue de 17 % (22 proyectos), con un aporte de \$5.347.030.000, todos presentados por instituciones de educación superior. En cuanto a los proyectos Fondap, de acuerdo a las bases estadísticas de Conicyt, en el período 2008-2011 con tres proyectos presentados, hay 0 % de adjudicación de proyectos en las disciplinas asociadas a las ciencias agrícolas, al igual que en el programa PIA, con ninguna propuesta presentada en estas disciplinas para dicho período (www.conicyt.cl).

Entre los aspectos que limitan la innovación en el sector, es posible señalar:

1. Baja inversión. En Chile, el gasto global en I+D sobre el PGB es de solo 1/10 del estándar de un país desarrollado. Esto ya es un indicador significativo, y al parecer la calidad de nuestras investigaciones en general no está a la altura, como lo demuestra el bajo número de publicaciones científicas y patentes industriales presentadas en Chile.
2. Falta de acción colectiva en el sector agropecuario y de alimentos. La percepción es que la producción está muy atomizada y es individualista, ya que existe un alto grado de fragmentación de las agencias de fondos públicos.
3. Compromiso limitado del sector privado en I+D+i. En el sector privado hay poca capacidad y, aparentemente, poco interés en invertir en investigación que pueda mejorar el valor agregado del sector agropecuario y de alimentos, con una visión de corto plazo, lo cual en parte se asocia a una limitada capacidad financiera para invertir en I+D+i. Los presupuestos y el dinero en la industria nacional son manejados por los profesionales de márketing y ventas, cuyos objetivos son cortoplacistas, ya que ellos son medidos por resultados inmediatos, y la I+D+i es estratégica. Las grandes empresas multinacionales (Nestlé, Bayer, etc.) han organizado sus unidades de I+D+i de manera estratégica con planes a largo plazo muy relacionados con los negocios. Definidos los objetivos, tienen presupuesto e independencia para manejarse.
4. Mercado de capital de riesgo. En el caso de investigadores —emprendedores (que en general son los menos)— pueden hoy directamente optar al mercado de capital de riesgo existente. Paradójicamente, el riesgo asumido por estos capitales sigue siendo bajo, financiando generalmente innovaciones comerciales más que nuevas ideas que permitan la generación de conocimientos que de por sí son de mayor riesgo.
5. Bajos niveles de capacitación de los emprendedores agropecuarios. Los estudiantes del sector agropecuario y de alimentos por lo general no se entusiasman por desarrollar habilidades empresariales, lo que

puede convertirse en una limitante en la futura gestión del sistema de innovación y el crecimiento del sector.

6. Capital humano avanzado escaso en el sector público y privado. Si bien la educación universitaria es de calidad suficiente, la cantidad de profesionales posgraduados es demasiado baja para satisfacer las necesidades de investigación y desarrollo que Chile necesita para sus cadenas de valor agropecuarias y de alimentos. Es de suma importancia generar una comunidad del conocimiento local y tomar provecho de esta. El programa PAI de Conicyt (atracción de capital humano avanzado) es una buena iniciativa, la cual debe utilizar también la industria. Se deben ofrecer atractivas alternativas a estos profesionales para atraerlos. De la misma forma, el medio local debe ser capaz de interesar a estos generadores de conocimiento de cualquier nacionalidad. Un medio ambiente de innovación adecuado generará de por sí más conocimiento.
7. Falta de calidad y consistencia en productos de exportación tan importantes como frutas chilenas, en comparación a la de otros competidores del hemisferio sur como Nueva Zelanda, lo que redundará en un mejor precio para ellos en los mercados internacionales. Los “puntos débiles” se han atenuado, pero son temas aún pendientes de mejorar, como la consistencia de producción; disponer de mayor apoyo promocional y de marketing; mejorar aún los tiempos de entrega y logística; incrementar la percepción y comprensión del mercado; continuar con el desarrollo de la coordinación de la industria y mejorar la oferta de calibres homogéneos y del tamaño demandado por los mercados.
8. Falta de visión estratégica. El sector necesita una visión estratégica y estar focalizado en el potencial de mercado de largo plazo, más que dedicarse a estudiar solo temas de productividad.
9. Baja o nula relación academia-industria. Hoy en día, para el sector privado la I+D+i está basada en el consumidor y se origina en un conocimiento acabado de este. La academia no recoge esta realidad, haciendo suposiciones de las necesidades de I+D+i del sector privado.

Oportunidades: Chile debería potenciar su imagen internacional asociándola a la diversidad climática y a la diversidad productiva que esto permite, generando instancias de I+D+i particulares para cada región productiva e integrada a redes nacionales. Del mismo modo, existe una gran potencialidad de utilización de recursos genéticos locales, que aún no ha sido desarrollada.

Desafíos: Se debe trabajar en temas de sustentabilidad ambiental en el sector agropecuario y de alimentos; por ejemplo, en la línea del Código Nacional de Sustentabilidad de la Industria Vitivinícola de Chile (www.sustentavid.org), del cual carecen importantes sectores exportadores, como el avícola, porcino, lechero, por nombrar algunos, lo que ayudaría a promover una imagen de “productos sanos” y de sectores productivos preocupados por el medio ambiente, los que son valorados tanto por el

mercado interno como externo, aspecto que Nueva Zelanda, África del Sur y países europeos han implementado. Recientemente, Asoex presentó la “Guía de Buenas Prácticas de Sustentabilidad”, iniciativa que busca facilitar la implementación de los principales requisitos de sustentabilidad para la industria frutícola nacional, lo que se espera contribuya en este proceso, pero aún es una medida incipiente, quedando mucho por avanzar en el sector agropecuario y de alimentos.

PARTE II: Análisis de un ejemplo específico

El origen de la idea de este ejemplo específico nace a partir de las conclusiones del proyecto Fondecyt 1020151, concluido en el mes de marzo de 2005 y desarrollado por los laboratorios de Fisiología del Estrés en Plantas y de Enología y Metabolitos secundarios de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, con un financiamiento aproximado de \$75.000.000. El proyecto consistió en estudiar la fisiología de plantas en dos variedades tintas de vid para elaboración de vinos en el valle del Maipo y la respuesta del metabolismo de sus frutos al modificar algunas prácticas usuales de manejo cultural.

Muchas prácticas vitivinícolas comunes en Chile provienen de observaciones a los sistemas de producción franceses. Sin embargo, tales condiciones de producción contrastan con las de la mayoría de los valles cálidos de Chile, al contar aquellas con precipitaciones estivales de hasta 1.000 mm de lluvia y con muchos días nublados y fríos. Asociadas a tales condiciones, las prácticas de no regar o hacerlo de manera mínima y de ajustar la carga de los viñedos (eliminar parte de los racimos) es muy común y frecuente en los viñedos franceses de producción de vinos de alta gama.

Como resultado del proyecto Fondecyt mencionado, se pudo concluir que la implementación de las prácticas de riego y de ajuste de carga no eran adecuadas para las condiciones edafo-climáticas chilenas, ya que atentaban contra el rendimiento, retorno económico de los planteles vitivinícolas y la sustentabilidad de los viñedos de clima cálido nacionales. Estas conclusiones nacieron de ensayos y experimentos básicos en relación con capacidad fotosintética de plantas y metabolismo secundario de bayas, y se plasmaron en artículos como “Low Molecular Weight Phenolic and Anthocyanin Composition of Grape Skins from cv. Syrah (*Vitis vinifera* L.) in the Maipo Valley (Chile): Effect of Clusters Thinning and Vineyard Yield, Food Science and Technology International. 2007, 13: 153-158, de los autores A. Peña-Neira, A. Cáceres, and C. Pastenes”.

Específicamente, de los resultados obtenidos nace la idea de que la calidad de la fruta para la producción de vinos de alta gama no disminuye si no se eliminan los racimos del viñedo (aumentando el rendimiento entre 30 % y 40 %, aproximadamente) y si se riegan con mayores aportes de agua (se incrementan los rendimientos potenciales en 20 %, aproxi-

madamente, además de alargar la vida media de los plantales vitícolas chilenos).

Evolución de la idea hasta estado precompetitivo

La idea, a partir de los resultados obtenidos inicialmente, fue postulada y seleccionada como uno de los 21 proyectos iniciales en el marco de la iniciativa público-privada Consorcio Tecnológico del Vino Vinnova-Tecnovid S. A., financiada por Innova-Corfo, como proyecto individual por un monto de \$104.150.622, denominado “Maduración de bayas: metabolismo primario y secundario en relación con componentes determinantes en la producción de vinos finos y su modulación por luz y riego (05CTE02-07) [2006-2010]”.

La idea entonces alcanzó un estado precompetitivo en aproximadamente cuatro años, tiempo necesario para lograr la adjudicación y posterior desarrollo de un proyecto apoyado inicialmente por la asociación de productores de vinos finos de exportación Chile-Vid, la que posteriormente se fusionó con Viñas de Chile, formando Vinos de Chile. Al término del proyecto, se comprobó y demostró que los atributos y composición de los frutos de vides tintas no se ven afectadas al mantener la totalidad de la carga y al aumentar, dentro de ciertos márgenes, el nivel de riego. Ambos factores contribuyen a elevar el rendimiento de los viñedos de Chile, sin perder la calidad de la fruta con propósitos de elaboración de vinos tintos de alta gama.

Dentro de las actividades del consorcio, se procedió a su difusión en al menos tres presentaciones nacionales y regionales de alta convocatoria (enólogos, viticultores y empresarios de la industria del vino) con un promedio de 100 asistentes cada una. Asimismo, se realizaron al menos cinco presentaciones dirigidas a profesionales de la industria del vino en el valle del Maule y lugares aledaños. Todas estas, en el marco de las actividades de difusión del proyecto.

Además, estos resultados se continuaron presentando en otras charlas por parte de los investigadores principales, como invitados a reuniones de asociaciones gremiales y profesionales de distintos valles vitivinícolas de Chile. Asimismo, los resultados que sostenían la idea de innovación en el manejo agronómico de producción de vides para la producción de vinos tintos de alta gama fueron parte importante del diplomado de extensión “Fisiología de la Vid de Interés Enológico”, destinado a profesionales viticultores y enólogos. Finalmente, tales resultados se incorporaron como material docente en la formación de ingenieros agrónomos viticultores y enólogos de la universidad donde ejercen docencia los investigadores responsables de la idea.

En el presente, las prácticas de riego de viñedo en empresas del valle central de Chile se han modificado sustancialmente y los manejos de ajuste de carga se han limitado a situaciones complejas que lo ameriten.

Fondos de financiamiento público y privado

Tal como se ha mencionado, la innovación surgió de proyectos financiados por el programa Fondecyt de Conicyt, presentados por la Universidad de Chile y el Consorcio Tecnológico del Vino Tecnovid financiado por Innova-Corfo, en el que, además de las universidades, participaron inicialmente las empresas asociadas a ChileVid A. G. y posteriormente a Viñas de Chile A. G. (ambas asociaciones gremiales fusionadas desde el año 2007 en Vinos de Chile).

Principales impulsos recibidos y obstáculos al desarrollo

El proyecto fue posible de desarrollar por la actitud y voluntad de colaboración de áreas de investigación distinta pero complementarias a la enología, como son la biología, fisiología vegetal, metabolismo de compuestos secundarios y la química enológica.

El representante de la organización Chile-Vid, que discutió los detalles de cada proyecto del consorcio, mantuvo un altísimo interés en la adjudicación de este proyecto. Su intervención y coordinación en la postulación del mismo, su interlocución con los agentes de Corfo y su compromiso en avanzar en la postulación, negociando con otros competidores, fue muy importante en el logro del financiamiento para el desarrollo de la idea.

Además, la contraparte enológica de los proyectos que favorecieron la evolución de la idea de innovación mantenía fuertes lazos con la industria del vino por su participación en organizaciones gremiales relativas a la enología de Chile. Esto favoreció y fortaleció las posibilidades de contar con el apoyo financiero de la industria como contraparte en el desarrollo del segundo y definitivo proyecto.

Uno de los principales obstáculos por vencer, por parte de todos los proyectos del consorcio tecnológico, dentro de los que se incluye el que permite el desarrollo de la idea de innovación, fue la dificultad de lograr un acuerdo de cooperación con otra universidad chilena, que también participó como competidora, en el concurso.

Una vez que concluyó el proyecto, aun cuando los profesionales de la industria asistieron muy interesadamente a las actividades de divulgación de los resultados obtenidos, fueron muy reacios a implementarlas en sus sistemas productivos en un comienzo. La mayor parte de las decisiones de campo en la industria del vino son tomadas por profesionales enólogos, de fuerte trabajo en bodega y ausentes en el campo. Los enólogos chilenos se caracterizan por realizar muchas temporadas de vendimia (cosecha y elaboración de vinos) en diversos países productores de vino del mundo. En ellos, la tradición es muy fuerte. La participación de estos profesionales en actividades de formación, como el diplomado mencionado anteriormente, que considera largas explicaciones y

extensas materias relativas a los principios que determinan la calidad enológica de la fruta, fue finalmente una de las vías que permitieron la adaptación de la innovación en el manejo de riego y de carga frutal en los viñedos chilenos.

Principales aspectos que se identifican en el éxito del caso de estudio

La experiencia del grupo de investigación y su capacidad analítica previa, así como la complementariedad de las áreas expertas involucradas, resultaron de fundamental importancia. Asimismo, el desarrollo de esta idea en el contexto de la universidad permitió contar con estudiantes de pre y de posgrado que trabajaron en el desarrollo de cada una de las etapas de cada proyecto. Lo anterior significa que los costos de mano de obra del proyecto son menores y la calidad de la misma, de muy buen nivel. La calidad de la mano de obra en la ejecución de cada uno de los ensayos de la investigación es fundamental para lograr resultados confiables y escalables.

Plasmar la idea en una práctica aceptada se sustentó en que la investigación se realizó en un centro de investigación de prestigio y que los investigadores asociados a esta idea son considerados “independientes” (es decir, no comprometidos con empresas en particular) y de buen nivel por parte de los profesionales de la industria vitivinícola y enológica.

Papel del ámbito académico en la evolución de la idea original

En general, en los sistemas universitarios nacionales las ideas en torno a la investigación básica y aplicada están lideradas por la creatividad de los propios investigadores, orientados a temas de su interés que pueden o no coincidir con las necesidades del sector productivo. Este fue el caso del proyecto que dio curso a la idea original.

Respecto de los recursos humanos disponibles, se debe enfatizar que contar con investigadores competitivos y de buen nivel facilita la implementación de proyectos complejos. Esto, porque aun cuando los proyectos de investigación financian equipamiento, lo más importante es contar con investigadores colaborativos que actúen aportando creatividad y análisis crítico de los resultados. La disponibilidad de investigadores competitivos en este caso, así como el ambiente universitario, con estudiantes de pre y posgrado, permitió el desarrollo del proyecto, alcanzando resultados contundentes.

El principal obstáculo en la mantención de la línea de investigación es la estructura del consorcio tecnológico, en la que cada parte (privados y universidades) mantiene una proporción en el directorio y lo

administran sin buscar un objetivo común, sino tratando de imponer sus porcentajes accionarios, en muchos casos mayoritarios para el sector privado por su mayor aporte pecuniario inicial. Para las empresas, las universidades son una necesidad para mantener el sistema funcionando, no entendiendo aspectos como *overhead* o que el equipamiento científico necesario para el desarrollo de la idea no es un bien de la sociedad anónima que se vende cuando se requieren fondos para, por ejemplo, la mantención de su planta administrativa, lo que se debe a que el equipamiento es de propiedad del consorcio y se deja con cierto grado de inestabilidad el uso de este para futuras propuestas investigativas de los grupos de las universidades. Para estas, generar resultados aplicables en proyectos de corta ejecución es una meta compleja, no siendo fácil conectarse con las necesidades de la industria, pues en algunos casos es difícil transferir resultados que corresponden a etapas intermedias de I+D+i. Este problema no necesariamente existe en todos los proyectos administrados por el sistema de consorcios. En el caso descrito en particular, la incorporación de un representante de la universidad ante el directorio del consorcio, que no demuestra interés personal en su desarrollo, ha resultado hasta ahora una condición de inestabilidad en la disponibilidad en el mediano-largo plazo del equipamiento y de poca continuidad del grupo de investigación en otras iniciativas del mismo consorcio. Muy probablemente, el hecho de que este representante sea más bien un recurso humano de administración general y no un científico o administrativo que promueva la investigación y desarrollo resulta ser un problema.

Aspectos institucionales

Los proyectos que permiten, inicialmente, la generación de una nueva hipótesis (Fondecyt) y su resolución posterior, en el ámbito de aplicación (consorcios), corresponden a concursos de fondos públicos. En el primer caso, este concurso, aunque no de manera exclusiva, permite desarrollar investigaciones no necesariamente aplicadas, pero de calidad internacional (es obligatoria la publicación de resultados en revistas de corriente principal) que sirvan de base a la generación de hipótesis con aplicación en la industria. En el segundo caso, se trata de un concurso más reciente, destinado específicamente a desarrollar investigaciones conducentes a generar innovación y que requirió en su concurso aportes pecuniarios de la industria y universidades. En el proceso de concurso del proyecto que desarrolló la idea conducente a la innovación de manejo de riego y de carga frutal, los ejecutivos de la administración pública responsable de este proyecto en particular, radicados en Corfo, demostraron gran capacidad y voluntad de apoyo en el proceso de su formulación, de seguimiento de objetivos por plantear e, incluso, como huéspedes en conversaciones con universidades competidoras.

A pesar del gran nivel de compromiso demostrado en el proceso de formulación y concurso, los organismos del Estado responsables del seguimiento financiero y de informes técnicos se mantuvieron, por motivos de diseño reglamentario de los consorcios, ausentes de su desarrollo e implementación. Finalmente, una de las partes constituyentes del consorcio decidió en un directorio vender el equipamiento adquirido debido a la falta de fondos. Puesto que se trataba de consorcios financiados fuertemente con fondos públicos, es importante tener en cuenta la opinión de estos organismos en relación con decisiones de este tipo.

Asimismo, esta iniciativa, nacida como herramienta de asociatividad e innovación, tuvo corta vida en lo financiero, reduciéndose muy fuertemente en el presente. La innovación en la agricultura requiere de una acción permanente, de manera de mantener laboratorios cada vez más especializados en sectores productivos específicos y conectados más prolongadamente con los actores productivos. Las iniciativas de corto plazo no alcanzan a promover aplicaciones de impacto, ni a generar profesionales con niveles de especialidad elevados en áreas productivas sensibles. Además, el equipamiento resultante de estas iniciativas queda inmediatamente libre y disponible para la implementación de actividades de investigación aplicada, pero para otros rubros distintos a los que promovieron su implementación inicial.

Las organizaciones empresariales, por otra parte, no obstante su fuerte entusiasmo y compromiso en la adjudicación de los proyectos, entre los que se encuentra el que permitió el desarrollo de la idea de innovación, incluso aportando con fondos pecuniarios, no parecen tener ideas claras de modelos de desarrollo de innovaciones productivas asociadas con universidades. Al menos no en el largo plazo. Por lo mismo, estrategias como la venta de equipos para la supervivencia del consorcio (para financiar secretaría, oficina y teléfono) ocurrieron por decisiones de sus representantes, que conformaban mayoritariamente los directorios de tales consorcios.

Se debe reconocer, por último, que por parte de las organizaciones empresariales que apoyaron el desarrollo de los consorcios, uno de los estamentos de mayor relevancia lo constituyeron sus profesionales, viticultores y enólogos. Aun cuando, como se señaló anteriormente, se trata, especialmente en el caso de los enólogos, de profesionales muy conservadores y tradicionales, estos demostraron permanente interés en las actividades de difusión de resultados. Asimismo, su participación en actividades de extensión de la universidad donde se realizó el desarrollo de la idea de innovación permitió la masificación de su implementación.

Contribución de los instrumentos gubernamentales

Como se señaló anteriormente, dos fondos de financiamiento fueron importantes en el desarrollo de la idea conducente a la innovación descrita en el área vitivinícola.

Análisis crítico sobre los niveles de formación de profesionales y técnicos

A lo largo del desarrollo de la innovación, se involucraron investigadores, personal técnico y profesional de apoyo al proyecto, estudiantes de pre y de posgrado. Posteriormente, se incluyó a los profesionales de la industria del vino en Chile, para fines de extensión e incorporación de nuevos manejos en las actividades de producción de uva para fines enológicos. Respecto del componente científico, estos ya trabajaban en las áreas expertas que concurrieron a la investigación básica que llevó a la implementación de una segunda investigación, esta vez aplicada. En cuanto al componente técnico del proyecto, este consideró a técnicos de laboratorio y bioquímicos. Estos últimos lograron incorporarse rápidamente a los trabajos, incluso a nivel de campo, manteniendo una visión crítica de las metodologías y analítica necesaria, así como de los resultados. Los estudiantes de pre y de posgrado fueron un aporte en el desarrollo de ensayos. La disponibilidad de estudiantes de doctorado fue escasa y, de haber sido mayor en este proyecto, posiblemente hubiese multiplicado el manejo de los resultados, así como la obtención de otros. Finalmente, en lo que respecta a los profesionales viticultores y enólogos, todos ingenieros agrónomos, estos contaban con una preparación básica lo suficientemente fuerte y consistente como para comprender la metodología de los ensayos y la investigación en general, la contundencia de los resultados y el impacto potencial sobre la calidad enológica del producto final de la industria y con suficientes conocimientos en aspectos de aplicaciones de tecnologías que contribuyen a la ejecución de los ensayos (por ejemplo, sistemas de riego). En este sentido, la masificación de una nueva práctica de manejo fue posible gracias a la capacidad de los profesionales de la industria para comprender resultados que dicen relación con química enológica, fisiología vegetal y biología molecular.

Conclusiones y recomendaciones

Entre los aspectos relevantes en el éxito del estudio, se cuentan:

1. Disponibilidad y capacidad de colaboración de investigadores en áreas distintas y complementarias, que permitieron la postulación de la idea, su desarrollo y elaboración de conclusiones. Asimismo, estos investigadores mantenían líneas de investigación consolidadas con capacidad de análisis en los temas ensayados.
2. Disponibilidad de fondos de investigación concursables tanto en aspectos básicos como, posteriormente, en aspectos aplicados, pero con requerimientos de investigación compleja para su demostración. Respecto de los fondos de investigación, destinados al desarrollo de I+D+i, el fondo Innova-Corfo de Consorcios Tecnológicos promueve la asociatividad de toda una industria.

3. Existencia de una industria comprometida con la postulación de los proyectos de investigación, con su seguimiento y con la capacidad de aportar pecuniariamente a su desarrollo. Además, con profesionales en esta industria con una formación lo suficientemente sólida como para comprender la naturaleza de la investigación, sus resultados y sus potencialidades.
4. La existencia de universidades complejas, que además de albergar recursos humanos competitivos en investigación realicen docencia de pregrado, de magíster y de doctorado, lo que permite incorporar recursos humanos de apoyo de sólida formación y amplias capacidades intelectuales en el desarrollo de la idea.

Recomendaciones para mejorar en forma significativa las funciones de las instituciones, las orientaciones de los instrumentos y la formación de profesionales y técnicos en las universidades

A partir de los factores que facilitaron el éxito en la investigación que permitió la formulación de nuevas hipótesis y, posteriormente, la implementación de proyectos de investigación conducentes a la demostración de tales hipótesis, en el marco de proyectos con la concurrencia asociativa de una importante parte de la industria del vino en colaboración con universidades, es posible considerar algunas recomendaciones. En primer lugar, los fondos de investigación básicos no excluyen la posibilidad de conseguir ideas con aplicación en el sector productivo. Asimismo, los fondos aplicados deberían no solo promover la asociatividad de la industria (a gran escala), sino, además, generar estrategias que permitan mantener tales colaboraciones en el largo plazo.

Respecto de las universidades, la formación y el financiamiento de estudios de posgrado son necesarios para la generación de recursos humanos altamente calificados para el desarrollo de proyectos de investigación tanto básicos como aplicados. Del mismo modo, contar con centros de emprendimiento e innovación en las universidades (y formar a los futuros profesionales con un mayor espíritu de emprendimiento) y con departamentos de cooperación técnica que articulen las necesidades del sector productivo de I+D+i con las capacidades de las universidades de forma expedita y sin burocracia en la obtención de documentos para participar de manera conjunta en la postulación a fuentes de financiamiento concursables son algunas recomendaciones que permitirían mejorar las funciones institucionales.

Literatura citada

- ADJEI-NSIAH, S., LEEUWIS, C., GILLER, K. E. y KUYPER, T. W. (2008) 'Action research on alternative and tenure arrangements in Wenchi, Ghana: learning from ambiguous social dynamics and self-organized institutional innovation', *Agriculture and Human Values*, Vol. 25, n.º 3, pp.3 89-403.
- ÁLVAREZ R., CONTRERAS C. y CONTRERAS J. L. 2012. Análisis de los Consorcios Tecnológicos Empresariales en Chile. *Estudios Públicos* 126: 87-121.
- DORMON, E. N. A., LEEUWIS, C., FIADJOE, F. Y., SAKYI-DAWSON, O. y VAN HUIS, A. (2007) 'Creating space for innovation: the case of cocoa production in the Suhum-Krabo-Coaltar district of Ghana', *International Journal of Agricultural Sustainability*, Vol. 5, n.º 2-3, pp. 232-246.
- HALL, A. (2006) 'Public-private partnerships in an agricultural system of innovation: concepts and challenges', *International Journal of Technology Management and Sustainable Development*, Vol. 5, n.º 1, pp. 3-20.
- HARTWICH, F. y TOLA, J. (2007) 'Public-private partnerships for agricultural innovation: concepts and experiences from 124 cases in Latin America', *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology*, Vol. 6, n.º 2, pp. 240-255.
- [HTTP://WWW.CHILEALIMENTOS.CL](http://www.chilealimentos.cl) (accedido el 4 de julio de 2013).
- [HTTP:// WWW.FAO.ORG/HOME/EN/](http://www.fao.org/home/en/) (accedido el 4 de julio de 2013).
- [HTTP://WWW.FIA.CL/PORTALS/0/BANCOMUNDIAL/CHILE%20VISION%202030%20ESP](http://www.fia.cl/PORTALS/0/BANCOMUNDIAL/CHILE%20VISION%202030%20ESP.pdf). PDF "Una Visión de la Innovación Agraria Chilena hacia el 2030". FIA (2011) (accedido el 4 de julio de 2013).
- [HTTP://WWW.OIV.INT/OIV/CMS/INDEX?LANG=ES](http://www.oiv.int/oiv/cms/index?lang=es) (accedido el 10 de julio de 2013).
- [HTTP://WWW.SUSTENTAVID.ORG](http://www.sustentavid.org) (accedido el 17 de julio de 2013).
- KLERKX, L. HALL, A. y LEEUWIS, C. (2009). "Strengthening agricultural innovation capacity: are innovation brokers the answer?". *Int.J. Agricultural Resources, Governance and Ecology*, Vol. 8, n.º 5/6, pp. 409-438.
- NELSON, R. C. (2007) 'Transnational strategic networks and policymaking in Chile: Corfo's high technology investment promotion program', *Latin American Politics and Society*, Vol. 49, n.º 2, pp. 149-181.
- POMAREDA C. y HARTWICH F. 2006. *Innovación Agrícola en América Latina: comprendiendo el papel del sector privado*. International Food Policy research Institute, Washington, D. C. USA, pp. 1-6.
- RÖLING, N. (2009) 'Pathways for impact: scientists' different perspectives on agricultural innovation'. *International Journal of Agricultural Sustainability*, Vol. 7, n.º, pp. 83-94.
- THOMAS, G. y SLATER, R. (2006) 'Innovation, agricultural growth and poverty reduction', *International Journal of Technology and Globalisation*, Vol. 2, n.º 3/4, pp. 279-287.

Figuras

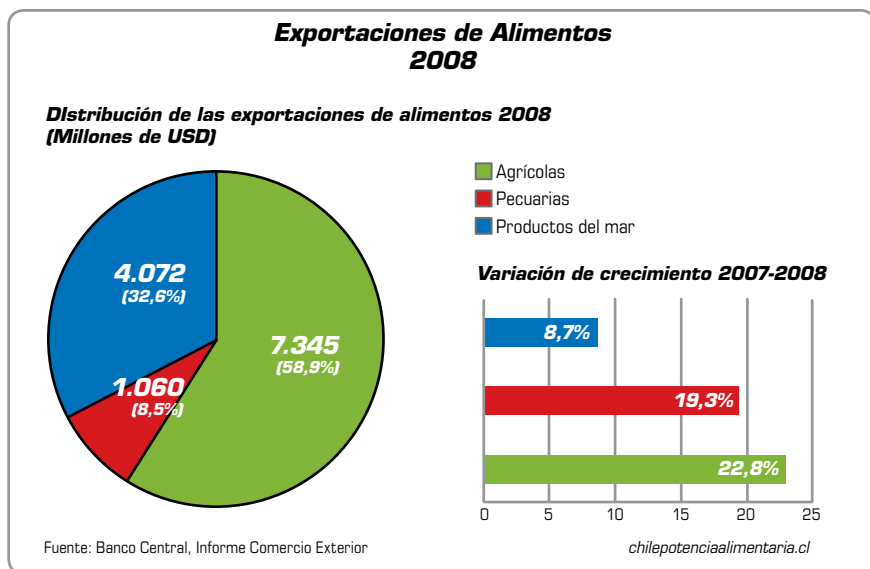


Figura 1. Aporte en millones de dólares de los principales rubros exportadores de Chile.



Figura 2. Aporte porcentual de los principales rubros agropecuarios de Chile.

ÁREA CIENCIA DE LOS MATERIALES

Desarrollo de nuevos materiales: casos de investigación con impacto comercial en nanotecnología y nuevos usos del cobre

Raúl Quijada (Coordinador),

Depto. de Ingeniería Química y Biotecnología,
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,
Universidad de Chile.

Humberto Palza (Coordinador),

Depto. de Ingeniería Química y Biotecnología,
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,
Universidad de Chile.

René Rojas,

Depto. de Química Inorgánica,
Facultad de Química,
Pontificia Universidad Católica de Chile.

David Vargas,

Director Ejecutivo, Duam S.A.
Innovación al Sur del Mundo.

Resumen

La ciencia de los materiales y su importante generación de conocimiento nuevo promueve actualmente en el mundo innovaciones tecnológicas en los más diversos rubros industriales, entregando productos cada vez mejores y con propiedades específicas que están transformando los procesos de manufactura hacia otros energéticamente más eficientes.

Chile, cuantitativamente todavía con escasos científicos en esta área, recibió un fuerte impulso cuando en 1997 el Gobierno creó el Fondo de

Financiamiento de Centros de Excelencia de Investigación en Áreas Prioritarias (FONDAP) y declaró a la ciencia de los nuevos materiales como una de estas áreas estratégicas para el desarrollo del país.

Con esta mirada visionaria surgió el Centro para la Investigación Interdisciplinaria Avanzada en Ciencia de los Materiales (CIMAT) en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, que congregó a un sólido equipo interdisciplinario de esa facultad como de otras facultades y universidades, y que funcionó con recursos de esa fuente estatal durante 1999-2009.

En el presente, el CIMAT continúa sembrando y cosechando nuevas semillas por los esfuerzos de diversos investigadores que han trabajado y que se han formado en su seno, pertenecientes principalmente a instituciones universitarias. Cada uno de ellos y desde sus laboratorios orienta sus líneas de trabajo en este quehacer esencialmente multidisciplinario, accediendo a otros fondos estatales o privados, y estimulando al mismo tiempo la formación de nuevos talentos en el área.

El CIMAT, por otro lado, recoge hoy lo que fue su ejemplar desempeño científico reconocido internacionalmente y su capacidad de atraer a las empresas, ganando confianza recíproca a través de diálogos fluidos. Desde sus cimientos a la fecha, ha estado desarrollando diversos proyectos de alto impacto tecnológico y ha contribuido a la evolución de otras importantes innovaciones en el país.

Solo en el área de la nanotecnología destacan dos investigaciones nacidas al alero del CIMAT con relevante eco en el mercado nacional e internacional: nuevos materiales basados en nanoarcillas, con fuertes aplicaciones en la industria automotora, la aeronáutica, la electrodoméstica, la construcción y la de embalaje, junto a nuevos materiales con nanopartículas de cobre que, por las propiedades bactericidas comprobadas de este metal, están teniendo importantes aplicaciones tanto en la salud como en la acuicultura.

El objetivo de este capítulo es presentar dos casos de investigación e innovación en ciencias de los materiales, donde el CIMAT ha jugado un rol relevante y que se espera tengan, o ya están teniendo, un importante valor comercial: Caso 1) Desarrollo de materiales que mejoran la distribución de nanopartículas en las matrices de polímeros sintéticos, y Caso 2) Nuevos usos del cobre como agente bactericida.

Estas apuestas tecnológicas que se hicieron fueron grandes, porque hubo ciencia de calidad, fondos estables, laboratorios especializados, equipamientos, empresas comprometidas y tiempo para que todo esto sucediera.

Parte 1

1.1. Innovación en las ciencias de los materiales

Desde los albores de la existencia humana, los materiales han sido fundamentales para el desarrollo de la civilización y cada época histórica fue marcada por el desarrollo de algunos de ellos, como las edades de piedra, del bronce y del hierro.

Más aún, la disponibilidad local de materiales y la capacidad de desarrollarlos de manera cada vez más sofisticada incidieron en los avances alcanzados en los estilos de vida entre los distintos grupos culturales.

En 1950 ya estaban a disposición nuevas y más complejas técnicas experimentales que permitieron el diseño de materiales para diversas aplicaciones específicas. Asimismo, ante la necesidad de materiales con mejores propiedades se comenzó a abordar la perspectiva multidisciplinaria de esta ciencia, como por ejemplo en el desarrollo de biomateriales para prótesis o implantes.

A nivel mundial, la investigación y el desarrollo de nuevos materiales ha sido el motor de la innovación tecnológica. Los expertos estiman que esta área jugará un rol crucial, una suerte de palanca impulsadora, en cuatro áreas que desafiarán el mundo en los próximos 30 años, como son la energía, el ambiente, la salud y la defensa.

De los diferentes tipos de materiales, parte de las innovaciones expuestas en este capítulo tienen una aplicación en los llamados polímeros sintéticos o materiales plásticos, en particular en una amplia variedad de plásticos comercialmente más utilizados —polipropileno (PP), polietileno (PE) o policloruro de vinilo (PVC), entre otros— y también biodegradables.

Los polímeros antes mencionados tienen las ventajas de tener bajos costos, usar como materia prima subproductos procedentes de la refinación del petróleo y tener propiedades que los hacen altamente aprovechables: flexibles en su desempeño y de fácil procesamiento.

Junto con esas ventajas, los polímeros, al estar constituidos por una o más unidades repetitivas —monómeros— generan un ambiente propicio para servir de molde o matriz para incorporar otros materiales, denominados aditivos, cargas o partículas.

En su conjunto, esta mezcla, polímeros y partículas, recibe el nombre de materiales compuestos o compósitos.

No obstante, en la ciencia de los materiales es relevante llegar a un equilibrio entre la cantidad de polímeros y los aditivos para lograr las propiedades deseadas en el producto final. Para conseguir lo anterior, en esta área experimental es imprescindible dispersar homogéneamente el aditivo o carga en la matriz del polímero. De este modo, se puede asegurar que las partes y las piezas que se armarán con los materiales compuestos también tendrán propiedades uniformes.

El mercado de los polímeros compuestos es cada vez más pujante. No solo se invierte menos en metales, que son más costosos y altamente demandantes en energía tanto para su obtención como para su producción, sino que además se ahorra energía en los procesos de fabricación. Además, el reemplazo de polímeros compuestos por metales hace que en el caso de los aviones y los automóviles se gaste menos combustible por la reducción de peso de los mismos.

Los avances mundiales están dirigidos a desarrollar polímeros para optimizarlos con nuevas partículas y obtener sorprendentes propiedades. Para esto, se necesitan nuevos polímeros con diversidad de propiedades para hacerlos más compatibles con estos materiales, como maderas, metales o vidrios.

Con el nacimiento de la nanotecnología, campo de la tecnología que manipula la materia en un rango entre 1 y 100 nanómetros (un nanómetro equivale a la millonésima parte de un milímetro; un micrómetro a la millonésima parte de un metro), la búsqueda de nuevos materiales poliméricos derivó en el desarrollo de los nanocompuestos, o sea, polímeros con introducción de partículas a nanoescala, que evidencia hoy un gran avance internacional.

Todas las aplicaciones más sofisticadas en nanocompuestos surgieron desde la ciencia de los materiales, la que ido creciendo progresiva y principalmente en Estados Unidos, Europa, Japón y China. Como su investigación es necesariamente interdisciplinaria, esta área se ha visto muy favorecida con la facilidad de las comunicaciones y un mundo cada vez más interconectado.

En Chile, la ciencia de los materiales germinó por la propia motivación de investigadores localizados principalmente en las instituciones universitarias. Por esta vía y sin coordinación entre ellos, se crearon diversos grupos desde la ingeniería, las ciencias básicas y la medicina, cada uno siguiendo distintas líneas de trabajo.

Tal situación viró positivamente cuando en 1997 el Gobierno de Chile decidió crear el Fondo de Financiamiento de Centros de Excelencia de Investigación en Áreas Prioritarias (FONDAP) y declaró a la ciencia de los nuevos materiales como una de las áreas prioritarias y estratégicas para el desarrollo socioeconómico del país.

Fue así como nació en 1999 el Centro para la Investigación Interdisciplinaria Avanzada en Ciencia de los Materiales (CIMAT), administrado por la Universidad de Chile y que tuvo financiamiento hasta 2009 cuando finalizó el FONDAP.

Durante ese período, el CIMAT estuvo conformado por un equipo multidisciplinario de importantes investigadores de las universidades de Chile, Católica de Chile y de Santiago.

Su director fue Fernando Lund¹; su subdirector Raúl Quijada², quien fue el responsable del desarrollo de los materiales poliméricos y, en particular, de aquellos que integraron la nanotecnología. Ambos científicos pertenecen a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

El quehacer del CIMAT catapultó con importantes investigaciones en nuevos materiales desarrollados en nanotecnología, como el uso de polímeros con nanopartículas.

En este capítulo se presentan dos casos de innovación que nacieron o fueron potenciados en el CIMAT, como son el desarrollo de nanopartículas a base de arcillas y nuevos usos del cobre como agente bactericida, ya sea como metal o como aditivo de plásticos, a nivel micro o nano.

Parte 2

2.1. Origen de innovaciones en nanocompuestos

Explorando innovaciones, el grupo científico partió con investigaciones a microescala, apuntando al descubrimiento de propiedades en nuevos materiales.

Con el nacimiento del CIMAT en 1999 se potenció todo lo necesario para descubrir qué aditivo, carga o partícula se podía agregar a los polímeros para mejorar sus propiedades. Las investigaciones entonces se centraron en un frágil material: la cáscara de huevo, y esta dio sorpresas.

Había una importante capacidad interdisciplinaria de investigadores, laboratorios para realizar los experimentos y tanto conocimiento como experiencias en el área de los nuevos materiales, principalmente entre académicos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

La industria, entretanto, ya estaba demandando más materiales plásticos con propiedades específicas y a costos más bajos, una meta que movía más la curiosidad del quehacer científico.

En el equipo de investigadores, liderado por Raúl Quijada (coordinador), surgió entonces la idea de incorporar a nivel micrométrico materiales naturales, como por ejemplo la cáscara de huevo, con el fin de sustituir productos comerciales.

Como el principal componente de la cáscara de huevo es el carbonato de calcio, se pensó entonces que este desecho avícola podía sustituir dos productos comerciales de origen mineral, el carbonato de calcio y el óxido de zinc (talco), que se emplean convencionalmente para otorgar a los polímeros mayor resistencia o rigidez.

Lo importante en este proyecto fue contar con la participación de José Luis Arias, parte del equipo del CIMAT a cargo de los biomateriales,

1 Doctor en Física de los materiales y Premio Nacional de Ciencias Exactas 2001.

2 Químico y Doctor en ciencia de polímeros.

quien ya estaba trabajando en el conocimiento estructural y morfológico de la cáscara de huevo, particularmente en la membrana adherida a esta, la que resultó fundamental en el polímero compuesto y sus propiedades.

Luego de dos años de investigación y un enfoque multidisciplinario, los científicos descubrieron que la membrana adherida a la cáscara de huevo funciona como un compatibilizante entre los pelets fundidos del polímero y las micropartículas de carbonato de calcio. Pudieron entonces entregar exitosamente este sustituto y mejorar las propiedades mecánicas.

Además, esta innovación podrá dar un importante aporte ambiental ante la opción de eliminar definitivamente la acumulación de cáscaras de huevo en las empresas avícolas y dar valorización a estos tipos de residuos. Al mismo tiempo, al emplearse este desecho, que tiene costo cero o muy bajo, los minerales que reemplaza no serían extraídos de las minas, con toda la inversión que ello implica.

El proyecto culminó con una patente otorgada en Chile (2010) y Estados Unidos (2008). En este momento está en etapa de comercialización³.

Esta invención comprende el uso de un refuerzo natural basado en la cáscara de huevo para la elaboración de materiales compuestos a base de polipropileno, uno de los plásticos más utilizados en el mundo. Se logró, además, mejorar los comportamientos mecánicos y térmicos en comparación con los materiales compuestos de polipropileno que utilizan como refuerzos minerales tradicionales.

Estos microcompuestos se utilizan en la fabricación de piezas específicas en la industria del automóvil, la electrodoméstica, la textil y la de empaques.

2.2. Unión casi perfecta

Sin embargo, todavía había que vencer un obstáculo. Los polímeros y los aditivos proporcionados a los mismos suelen comportarse como el agua y el aceite, es decir, a veces presentan una difícil combinación química permanente. La pregunta era cómo distribuir más uniformemente esta carga inorgánica y otras en la matriz del polímero.

Para resolver este problema, los investigadores lo estudiaron y desarrollaron un material compatibilizante a base de un compuesto natural llamado ácido itacónico.

El trabajo, divulgado en congresos y revistas científicas, tuvo tal impacto que el equipo del CIMAT fue contactado por la empresa petroquímica brasileña Braskem, con importante presencia en el mercado global y el tercer mayor productor de polipropileno en el mundo.

Braskem produce pellets de polímeros sintéticos y ciertamente está interesada en entregar un mejor producto a sus clientes.

3 Patente para el uso de relleno de cáscara de huevo. Inventores: Arias, José Luis & Quijada, Raúl & Toro, Patricio & Yazdani-Pedram, Mehrdad.

El desarrollo tecnológico de compatibilizantes comenzó en 2005, con fondos del CIMAT. En vista de esta investigación, en 2010 se estableció un acuerdo de escalamiento con Braskem para probar la tecnología a nivel piloto. Con tal propósito, la empresa financió este proyecto para desarrollarlo en Chile por un monto de US\$ 70.000 y, en 2011, otorgó al grupo de trabajo del CIMAT un premio a la innovación por US\$ 100.000.

La tecnología ha sido patentada en Chile (2006), China (2012) y Comunidad Europea (2013), con solicitud en EE.UU., India y Brasil⁴.

La presente invención se refiere al proceso de obtención del compatibilizante y su uso en la elaboración de nanocompuestos de poliolefina, microcompuestos y mezclas de polímeros.

El nuevo material permite obtener notables propiedades mecánicas mejoradas y presenta muchas aplicaciones, desde los parachoques en los automóviles hasta las partes de los electrodomésticos para que no se resquebrajen.

2.3. De lo micro a lo nano

Estas investigaciones llevaron al equipo científico del CIMAT a dar un paso más allá, como desarrollar polímeros con la herramienta de la nanotecnología.

Si las propiedades que se conseguía a nivel micro eran buenas, más fantásticas serían a nivel nano. Mientras más diminutas son las partículas incorporadas, mejor se comportan los polímeros que las reciben.

La investigación, que comenzó en 2005, se centró en el estudio de arcillas comerciales y arcillas volcánicas encontradas en Chile. Estas se estudiaron y se agregaron nanopartículas a la matriz de diferentes plásticos junto con el compatibilizante encontrado.

El desarrollo tecnológico de las arcillas y sus modificaciones posee patentes concedidas en Chile (2011) y Estados Unidos (2011)⁵.

Esta invención revela la elaboración de una nueva arcilla híbrida que usa el ácido itacónico como refuerzo para los nanocompuestos de poliolefina. En comparación a las arcillas que emplean refuerzos tradicionales o comerciales, se mejoran notablemente las propiedades mecánicas y térmicas.

Con respecto al empleo de nanoarcillas nacionales de origen volcánico, existe una patente presentada en Chile (2011) y en 2012 al Tratado de Cooperación en materia de Patentes (PCT)⁶.

Las innovaciones en nanoarcillas tienen como principal mercado la industria automotora, la de embalaje y la de construcción. Por ejemplo,

4 Patente compatibilizante. Inventores: Quijada, Raúl & Yazdani-Pedram, Mehrdad & Toro, Patricio & Moncada, Edwin.

5 Patente arcilla híbrida. Inventores: Quijada, Raúl & Toro, Patricio & Yazdani-Pedram, Mehrdad.

6 Patente nanoarcillas de origen volcánico. Inventores: Quijada, Raúl & Toro, Patricio & Yazdani-Pedram, Mehrdad.

tienen importante aplicación en los embalajes de exportación de Chile, en particular para que las frutas puedan mantenerse bien conservadas durante el recorrido de grandes distancias.

Este nuevo material actúa sobre la permeabilidad de los embalajes. Impide el ingreso de humedad y oxígeno a su interior y, a la vez, no deja salir otros gases para la mantención de los alimentos.

El trabajo con nanoarcillas también tiene otra patente presentada en Chile (2010), Estados Unidos (2011) y Brasil (2010)⁷.

La invención trata la elaboración de las nanopartículas con morfología controlada vía técnica sol-gel. Los nanocompuestos obtenidos mejoran las propiedades mecánicas, térmicas y de barrera. Por su composición constante, alta pureza y productos no tóxicos, se pueden utilizar, además, en la química y las industrias alimentaria y farmacéutica.

Actualmente, también está en curso un proyecto Innova de Corfo para extender el uso de arcillas como refuerzo de caucho natural para mejorar las propiedades de desgastes en procesos mineros. Este desarrollo se está realizando con la participación de la empresa Weir Minerals, líder en la manufactura de equipamiento minero para procesos de transporte de lodos y material.

2.4. Relevancia y mercado de nanocompuestos

Los nanocompuestos, por sus propiedades superiores a los compuestos convencionales y a microescala, se pueden sintetizar empleando técnicas simples y de bajo costo.

Con esta nueva aproximación no solo se pueden lograr mejoras en las propiedades del plástico con concentraciones 10 veces menores que con las partículas tradicionales, sino que también es posible encontrar nuevas aplicaciones no pensadas décadas atrás. Por tanto, lo más importante en los nanocompuestos poliméricos es la baja cantidad de carga que hay que colocar. Por eso los nanocompuestos son más livianos que los microcompuestos, lo que claramente redundará en el importante tema de eficiencia energética.

Además, la exploración actual está centrada principalmente en nanopartículas, porque estas se comportan de manera muy diferente de aquellos materiales con partículas macroscópicas. Por ejemplo, materiales que no son conductores pueden pasar a ser semiconductores por el uso de partículas a nivel nanométrico.

La adición de nanopartículas a los polímeros ha sido capaz de permitir nuevas propiedades en los materiales compuestos, pero los resultados dependen en gran medida del tratamiento de superficie de esas diminutas partículas y de los procesos utilizados.

7 Patente Sol-Gel. Inventores: Quijada, Raúl & Moncada, Edwin.

La principal demanda de estos nanocompuestos está en la industria automotora, la aeronáutica, la construcción, la electrodoméstica y la de embalaje, las que exigen materiales cada vez más livianos y con mejores propiedades mecánicas (como resistir altas temperaturas, impactos, deformaciones o rupturas, entre otras) y de barrera. Sus desarrollos son cada vez más específicos o a la medida, según las necesidades del mercado.

La innovación en nanocompuestos recibe una fuerte aceleración por las nuevas demandas de la sociedad que esperan de estas tecnologías materiales provenientes de fuentes renovables, menos contaminantes, más livianos y que, por tanto, contribuyan con el menor gasto de energía a liberar menos emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero.

Como se puede apreciar, el alto impacto de las aplicaciones actuales y futuras de los polímeros compuestos está principalmente relacionado con los beneficios tanto económicos como tecnológicos y ambientales del uso de la nanotecnología.

Alman Polímeros es una importante consultora del rubro en Brasil, país en que la nanotecnología es considerada un área estratégica. De hecho, existe un programa de nanotecnología en el Ministerio de Ciencia y Tecnología con el objetivo de estimular la investigación y desarrollo a través de fondos especiales.

También en Brasil se crearon diversas redes y programas para fomentar la interacción entre investigadores de las universidades o centros de investigación en nanotecnología de ese país.

El rápido avance en el desarrollo de nanocompuestos comenzó en la década del 90, cuando la Toyota innovó con el uso de nanopartículas en las matrices de los polímeros. La incorporación de estas diminutas partículas generó materiales compuestos (5% o 10% en peso) con propiedades similares a otros materiales con cargas convencionales, pero que representaban en peso un 40% o más.

El desarrollo de nuevos nanocompuestos ha recibido especialmente mayor interés en los últimos años, focalizado en la actualidad en la incorporación de nanopartículas “más especiales”, como nanotubos de carbono, láminas de grafeno y nanopartículas de cobre o arcilla, con gran interés en su estudio por sus aplicaciones en la medicina, la electrónica y los biomateriales.

También en los últimos años este tipo de investigaciones se ha incrementado en nuestro país por la disponibilidad de equipamiento de caracterización adecuada y por la amplia gama de aplicaciones a las que se puede acceder con este tipo de materiales.

Las aplicaciones de mayor crecimiento se asocian a aquellos nanocompuestos con propiedades bactericidas, resistentes al fuego, con baja permeabilidad a gases, con mejor balance de propiedades tanto mecánicas como térmicas, incluyendo la modificación de superficies.

Todas las innovaciones con estas propiedades ya son una realidad en el mercado. El consumo mundial de nanocompuestos alcanzó en

2011 aproximadamente 140.000 toneladas métricas, correspondientes a US\$ 920 millones, y se espera que para los próximos años supere las 330.000 toneladas métricas, con un valor de US\$ 2,4 mil millones⁸.

Los nanocompuestos de arcilla, en tanto, corresponden a más de la mitad de este mercado y su crecimiento para los próximos cinco años se estima en más de un 50%.

Hacia el 2020, los mercados de embalaje y de vehículos motorizados representarán el 40 % de la demanda total tanto de nanoarcillas como de nanocompuestos. De estos últimos, se espera que penetren en los mercados de las bebidas, las cervezas, los alimentos, la farmacéutica y la electrónica debido a sus inigualables propiedades de barrera, resistencia y conductividad.

La construcción emerge como un mercado importante para los nanocompuestos en cuanto a sus aplicaciones en tuberías, grifería, puertas, ventanas, revestimientos y aislación. Adicionalmente, se proyecta que aumente su ingreso al mercado de la electricidad y de la electrónica, básicamente como sustituto de materiales conductores.

Las nanoarcillas, en tanto, se han empleado en amplios sectores de la industria de automóviles, cosmética, envases, pigmentos, pinturas, papeles, dispositivos contra incendio y medicina. Últimamente también se han utilizado para descontaminar suelos y en la remoción de aceites o metales pesados del ambiente.

Las nanoarcillas constituyen una clase de aditivos completamente nueva, encaminados a movilizar las reservas potenciales de plásticos sin la necesidad de cambiar el proceso de fabricación. Es un material natural que tiene la particularidad de convertirse en una pasta plástica cuando se mezcla con agua y en cantidades adecuadas. Por tanto, tiene las mismas propiedades físicas del talco o la mica.

Muchos tipos de materiales arcillosos, tales como la bentonita, han sido utilizados como rellenos inorgánicos en polímeros convencionales con la finalidad de reducir costos y darles propiedades especiales, como barreras contra la humedad o resistencias a la tensión, la corrosión y la abrasión. Además, reducen la transmisión de rayos UV, incrementan la estabilidad dimensional de los materiales y poseen buenas propiedades para el reciclaje.

Un grupo de investigadores de la Universidad Católica de Chile, liderado por el doctor René Rojas, también trabaja en la búsqueda de las múltiples aplicaciones de los nuevos materiales, como las que tienen las nanopartículas de arcilla como aditivo en polímeros. Estos nanocompuestos los genera in situ, o sea, las unidades del polímero crecen en un reactor con distribución nanométrica de arcilla.

8 Bcc Research market forecasting (2012), Global Markets for nanocomposites, nanoparticles, nanoclays and nanotubes, NANO 21E.

Para este científico, una de las aplicaciones más importantes de estos materiales compuestos está en la industria automotriz (pisaderas de autos) o en materiales que requieran alta resistencia a la abrasión.

Spectrochem⁹ es un referente de la industria brasileña en el desarrollo, fabricación y comercialización de nanoarcillas que tienen una amplia aplicación en pinturas y otros productos. Esta empresa sostiene que los nuevos materiales basados en nanoarcillas abrirán grandes posibilidades en el desarrollo de plásticos y cauchos ecológicamente más viables.

2.5. Incursión con el cobre antimicrobiano

En 2003, la International Copper Association (ICA) —con sede en Nueva York, encargada de promover la ampliación del mercado del cobre— y el CIMAT organizaron un simposio en torno a los nuevos usos del cobre y, entre estos, se dio énfasis al metal como material bactericida.

Lo que atrajo al ICA fue la credibilidad del CIMAT, establecida por tratarse de un centro interdisciplinario competitivo a nivel mundial. A partir de esta asociación se generaron numerosas investigaciones, desarrollos y emprendimientos tanto en el CIMAT como en Chile y el resto del mundo.

Un ejemplo de esta acción conjunta fue el concurso internacional ICA-CIMAT para presentar durante tres años investigaciones académicas orientadas a encontrar nuevos usos del cobre. De los 300 proyectos mundiales que llegaron, se adjudicaron 10.

El administrador de esta iniciativa es quien fundó años más tarde Copper Andino, una compañía chilena que fabrica diversos productos con fibras de cobre y que se ha desempeñado con singular éxito, como se verá más adelante.

Con el correr del tiempo, estos eventos, que despertaron el interés de los investigadores y otros profesionales, se convirtieron en un puente hacia las más variadas aplicaciones del metal.

Como una reacción en cadena, el tema despertó un creciente interés de la industria en general, dado que, además, en 2008 la Environmental Protection Agency (EPA) —organización encargada de proteger la salud humana y el ambiente en los Estados Unidos— aprobó el registro de 270 aleaciones de cobre al valorar su propiedad bactericida para su uso en superficies sólidas de contacto.

Los rigurosos estudios experimentales de la EPA demostraron que el cobre y sus aleaciones, a diferencia del acero inoxidable, los iones de plata y los desinfectantes eliminan en 99,9% las bacterias patógenas en forma continua y permanente.

Con este anuncio, el cobre se convirtió en el primer metal sobre el cual recae este reconocimiento sustentado en un extenso trabajo de in-

9 www.spectrochem.com.br

vestigación científica. A la fecha, esas aleaciones aprobadas por la EPA superan las 400.

Ante este alentador escenario, la ICA dio un gran paso al lanzar en 2010 la marca registrada del cobre “Antimicrobial Copper Cu+”, para iniciar las aplicaciones que ya existen en gran parte del mundo en el sector salud, transporte y recintos educacionales.

Los resultados de la EPA provocaron tanta conmoción que la ICA inició en 2009 un estudio multicéntrico en las salas de Unidades de Cuidados Intensivos (UCI) para probar la propiedad antibacteriana del cobre. La experiencia finalizó exitosamente en siete hospitales de Inglaterra, Estados Unidos, Alemania, Japón y Chile.

En nuestro país, con el apoyo de Codelco, esta novedosa experiencia fue realizada en el Hospital Doctor Salvador Allende de Calama, conocido como Hospital del Cobre. Con este fin, participó la empresa nacional Duam S.A. en la fabricación de partes y piezas con aleaciones de cobre.

El gran objetivo de la iniciativa en varios hospitales fue disminuir las infecciones intrahospitalarias (IIH), un problema de salud pública aún no resuelto en ninguna parte del mundo.

Según información de la ICA, 24 millones de personas en el mundo adquieren IIH, equivalente al total de la población de Australia. Con este avance, hospitales y clínicas del mundo podrán por primera vez controlar las infecciones causantes de muchas muertes y de altos costos para los sistemas públicos.

Las IIH afectan mayoritariamente a pacientes internados en las salas de UCI, cuyos ocupantes han recibido intervenciones médicas invasivas o sus sistemas inmunológicos están debilitados o en formación.

Los patógenos que causan las IIH se transmiten fundamentalmente a través de las manos de los médicos, las enfermeras, los auxiliares de la salud y las visitas. Por contaminación cruzada, objeto-persona y persona a persona, la infección se propaga a los pacientes, pudiendo ser esta grave o potencialmente mortal. El reservorio de estos patógenos es el ambiente, o sea, las superficies de contacto.

En Estados Unidos los valores de IIH son demasiado altos. Según información del Centro de Control y Prevención de Enfermedades de ese país, cada año se producen más de 2 millones de IIH, ocasionando alrededor de 90 mil muertes con un costo de 4,5 a 5 mil millones de dólares por año.

Un estudio realizado en 2003 en hospitales públicos de Chile estimó en 70.000 los casos anuales de IIH, las cuales prolongaban la estadía de los pacientes en un promedio de 10 días y aumentaba el uso de antibióticos en los pacientes afectados en dos a cuatro veces, con el consiguiente aumento en los costos de atención¹⁰.

10 Brenner, P. & Nercelles, P. & Pohlenza, M. & Otaíza, F. (2003). Costo de las infecciones intrahospitalarias en hospitales chilenos de alta y mediana complejidad. *Revista Chilena de Infectología* (pp. 90-285), Vol. 20.

En los distintos hospitales del estudio multicéntrico se seleccionaron las principales superficies de contacto que más se contaminan en las salas UCI y las que fueron habilitadas con distintos elementos elaborados a base de cobre puro y aleaciones.

En el Hospital del Cobre, en Chile, esos elementos fueron: las barandas de las camas, las manillas de las camas, las cubiertas de las mesas de los pacientes, los porta-sueros, los antebrazos de las sillas de visitas y los lápices para escribir en los monitores *touches* presentes en las salas UCI.

En el estudio chileno la parte bacteriológica estuvo a cargo de la doctora Valeria Prado, profesora titular de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile.

En la investigación¹¹ se consideraron los principales patógenos resistentes a los antibióticos en los centros hospitalarios de Chile, como son el *Staphylococcus aureus*, resistente a la meticilina (SAMR); la *Acinetobacter baumannii* y la *Pseudomonas aeruginosa*, entre otros. Todas estas bacterias originan graves infecciones pulmonares, urogenitales, dermatológicas e incluso septicemias.

En el ensayo clínico chileno sorprendió la eliminación del SAMR, el principal protagonista de las infecciones intrahospitalarias en las últimas cuatro décadas y hoy refractario a la mayoría de los antibióticos disponibles. La carga bacteriana de este patógeno se redujo en 98,5% en las barandas de la cama, en 97,7% en las manillas de la cama y en 94,4% en las mesas de los pacientes.

Por otra parte, en una serie de experimentos independientes realizados en centros hospitalarios de Estados Unidos (Michael Schmidt, 2010) se comprobó que incluso si se limpian las superficies de contacto con desinfectantes autorizados, en muy corto plazo la carga bacteriana presente en los mismos retornan a los niveles observados antes de esa higienización.

A partir de todos estos auspiciosos resultados, la ICA empezó a promover los usos del cobre bactericida en la salud, básicamente en los recintos hospitalarios y en todos aquellos ambientes de alta afluencia pública —consultorios, metro, transporte público, colegios, bancos, supermercados (carros), universidades, baños públicos, gimnasios, postas, servicios de urgencia, entre otros—.

Asimismo, la ICA financió estudios preliminares con un aporte de US\$ 250.000. A partir de esta iniciativa se generaron varios emprendimientos nacionales, entre los que se puede mencionar el uso del cobre como antimicrobiano en la industria textil, mobiliario médico y la generación de proyectos tecnológicos (Corfo-Innova y Fondef) con aplicaciones en áreas de la salud y acuícola, comprometiendo montos solo en la Universidad de Chile de US\$ 500.000.

11 Prado, Valeria & Vidala, Roberto & Durán, Claudia (2012). Aplicación de la capacidad bactericida del cobre en la práctica médica. Revista Médica de Chile (pp. 1317-1324), Vol. 140.

En Chile, Codelco ha jugado un rol fundamental a través de su área de desarrollo de mercados y responsabilidad social empresarial, impulsando la aplicación de cobre antimicrobiano en superficies críticas de contacto en la Unidad de Pacientes Críticos del Hospital Roberto del Río y en el Hospital de Urgencia Asistencia Pública (HUAP, ex Posta Central).

Este último proyecto es a la fecha uno de los más grandes a nivel mundial en cuanto a la aplicación de cobre antimicrobiano en las superficies de contacto que más se contaminan en los ambientes hospitalarios.

También Codelco ha financiado y cofinanciado la aplicación de cobre antimicrobiano en superficies críticas de contacto en espacios públicos de la capital, como en la estación Santiago Buera de Metro y la Biblioteca pública de Santiago.

“En todos estos proyectos Codelco ha contado con la colaboración del equipo de CopperBioHealth para el diseño, fabricación e instalación de los productos y superficies de cobre antimicrobiano. CopperBioHealth es un emprendimiento chileno que en 2009 nació en la empresa Duam S.A., siendo hoy una de las empresas líderes a nivel mundial en este rubro”.

“Las aplicaciones de cobre antimicrobiano ya irrumpieron tanto en el mercado nacional como internacional, y existen varios proyectos en desarrollo que buscan aumentar su participación. Es así como CopperBioHealth proyecta materializar proyectos por US\$ 1 millón en el 2013 y mantener una tasa de crecimiento del 15% durante el trienio 2014-2016, consolidando en esta primera etapa una oferta responsable en el mercado local.

A nivel internacional, el mercado de materiales con acciones antimicrobianas alcanzó los US\$ 1,6 mil millones en 2012 y para 2018 se espera que crezca a US\$ 3,3 mil millones. Los principales usos de estas aplicaciones están en los sectores salud, envases de alimentos y almacenamiento, construcción, cosmética, mobiliario y cuidado personal¹².

Por lo tanto, el futuro de las investigaciones y emprendimientos nacionales relacionados con la propiedad antimicrobiana del cobre tienen un gran mercado para desarrollarse a nivel mundial. Este mismo escenario global ha llevado a la ICA a proyectar una demanda adicional de cobre mundial equivalente a 500 mil toneladas/año producto de la aplicación del cobre como metal antimicrobiano.

2.6. Otras aplicaciones del cobre metálico

Entre los emprendimientos nacionales también destaca Copper Andino, una empresa chilena que ha innovado incorporando sales de cobre y sales de zinc en polímeros, combinación que crea un efecto de sinergia que amplifica los beneficios antimicrobianos del cobre. Estos polímeros pue-

12 Antimicrobial Coatings Market-Global Industry Analysis. Growth and Forecast (2012-2018), Transparency Market Research, (2013).

den ser posteriormente convertidos en hilados textiles, telas no tejidas y un sinnúmero de otros productos.

La tecnología creada por Copper Andino está respaldada por cuatro patentes que les permiten comercializar en mercados como Estados Unidos, Canadá, Europa, China y otros países. Para efectos comerciales, esta tecnología ha sido registrada con el nombre de Incopper. En proceso tiene otras dos propiedades industriales presentadas al PCT, con más de 200 países signatarios.

Copper Andino no solo aprovecha las propiedades bactericidas del cobre, sino que también las propiedades fungicidas, antivirales y acaricidas, comprobadas en varios centros universitarios del mundo y Chile.

A estas propiedades antimicrobianas se suma incluso la propiedad del cobre sobre la piel, entre las que está corregir el colágeno, mejorar la tonicidad y la textura. Esto permite desarrollar productos con beneficios cosméticos, por ejemplo: atenuar arrugas.

Las propiedades de todos los productos desarrollados por Copper Andino son analizadas y certificadas por laboratorios locales e internacionales. También posee laboratorios para el desarrollo de sus tecnologías y actualmente está montando sus propios laboratorios microbiológicos.

En nuestro país, Copper Andino lanzó junto a la empresa textil chilena Monarch calcetines de fibras de cobre, emprendimiento que alcanza una venta de 600 mil pares al año. Asimismo, con la participación de Celulosa Arauco y Codelco, Copper Andino también introdujo tanto en el mercado nacional como latinoamericano una nueva línea de planchas de melamina con cobre, llamada melamina Vesto, que presentan un efecto antimicrobiano mucho más efectivo que las que utilizan plata.

Se suma una promoción que hizo con Copec durante el verano del 2012 de 350 mil sandalias con tecnología Incopper, las que fueron vendidas en 45 días.

Otros productos son las vendas y mandriles antimicrobianos con tecnología Incopper que son comercializados por la empresa Kawel, la que además desarrolló y patentó las herraduras de cobre.

El modelo de negocio de Copper Andino es establecer alianzas comerciales con empresas que produzcan y comercialicen productos con tecnología Incopper. Para ello tiene un socio comercial en China, la empresa IICC, la cual explora potenciales socios para elaborar productos en ese país.

Un ejemplo de esta coordinación es el acuerdo comercial con la empresa Vicsa para producir ropa de trabajo y equipos de seguridad que provean una protección adicional a los trabajadores. Entre los productos que se comercializarán con tecnología Incopper están las primeras capas, ropa interior, indumentaria de cama, zapatillas, zapatos de seguridad, guantes y mascarillas, entre otros.

En el mercado estadounidense, con la empresa Copperme lanzó calzones postparto y calcetines para diabéticos que han obtenido la aproba-

ción de la Food and Drug Administration (FDA) de los Estados Unidos. Pronto lanzará en Chile y en el mundo *mouses* y teclados con tecnología Incopper. Finalmente, en alianza con Codelco e IICC, introdujo este año ropa indumentaria en el Hospital de Quemados Shanghái, desde delantales, sábanas, toallas, cortinas y batas.

Copper Andino también desarrolló con el aporte de Corfo telas no tejidas antimicrobianas con cobre, tecnología Incopper, que son desechables. Estas telas se utilizan en mascarillas, batas, cubrecamillas, gorros, etc. Tales productos serán próximamente donados a la ex Posta Central de Santiago.

Copper Andino actualmente consume en sus líneas de productos varias toneladas de sales de cobre y zinc al año. Con los nuevos productos en etapa de desarrollo podrían llegar a consumir sobre 100 toneladas de estas sales al año. Sobre la venta de sus productos, esta empresa estimó que se trata de información confidencial.

2.7. Estudio de nanopartículas de cobre en el CIMAT

El equipo del CIMAT, en este caso teniendo como timonel al doctor Humberto Palza (coordinador), comenzó en 2007 a explorar nuevas tecnologías con propiedad bactericida del cobre.

Aprovechando la experiencia anterior ganada con nanocompuestos de arcilla, los científicos pensaron en la posibilidad de introducir nanopartículas de cobre a los polímeros. Se sumaron de esta manera las bondades tanto livianas como de procesamiento del plástico a la acción antimicrobiana del metal.

Pudieron demostrar que la mezcla entre un material plástico y las nanopartículas de cobre genera un nuevo material antimicrobiano que supera muchas de las limitantes de emplear cobre metálico en diversas aplicaciones.

El grupo de investigación comenzó a trabajar en la tecnología de incorporación de cobre nanométrico en distintas matrices poliméricas. En el 2011 se ingresó una solicitud en Chile de la patente que protege este desarrollo tecnológico y en el próximo año se solicitará al PCT¹³.

Para desarrollar esta tecnología, se levantaron fondos por aproximadamente \$200.000.000 de subsidios estatales Innova Corfo y del programa Idea de Fondef. Además, la empresa asociada Duam S.A. entregó \$30.000.000 para perfeccionar la tecnología a aplicaciones específicas, como disminuir la carga bacteriana en instalaciones hospitalarias y obtener efectos antifouling en la industria acuícola.

Actualmente el equipo desarrollador cuenta con profesionales del área de la ciencia de los materiales, como ingenieros químicos y doctores en materiales, además de especialistas en transferencia tecnológica.

13 Patente de polímeros con partículas de cobre. Inventores: Palza, Humberto & Quijada, Raúl & Delgado, Katherine & Pinochet, Ivette.

Esta investigación condujo a la creación de la empresa Plasticopper, que será la encargada de administrar la tecnología y su licenciamiento.

2.8. Mallas antifouling

A través de la adjudicación de un proyecto Fondef Idea, liderado por Humberto Palza (coordinador), los investigadores quieren resolver un importante problema de la industria acuícola, en particular la salmone-
ra, como lo es la formación de películas orgánicas (*biofouling*) en las jaulas plásticas donde se realizan los cultivos.

El costo de pérdidas potenciales asociado a las rupturas de las mallas, producto de la adherencia de microorganismos y algas, bordea US\$ 1 millón por jaula¹⁴.

Diversos estudios indican que hasta un 20% del precio final (de mercado) del salmón se relaciona con el *biofouling*, estimándose que el costo total asociado puede ser entre un 20% y un 80% de los costos totales de mantención. De esta manera, Chile, segundo mayor productor de salmón, está absorbiendo costos directos que estarían entre 18,3 y 80 millones de dólares al año¹⁵.

Las principales soluciones industriales actuales para impedir este tipo de incrustación biológica en las jaulas son: 1) cubrir la superficie de material plástico con una pintura antifouling; y 2) reemplazar el material plástico por una aleación metálica de cobre de mucho mayor costo y con dificultad de procesar.

Estas soluciones presentan la desventaja de que no son capaces de controlar la velocidad de liberación del agente y/o el material es activo por un corto tiempo. Además, tienen altos costos, tanto operacionales como de instalación.

Más aún, no existen en el mercado jaulas basadas en mallas plásticas que sean capaces ellas mismas de evitar el *biofouling*, generando un nicho de mercado altamente relevante, lo que le dio contexto y pertinencia a este proyecto.

Conocidas estas trabas, el CIMAT está desarrollando un nuevo material plástico capaz de liberar iones de cobre en forma controlada y por largo tiempo (más de un año), manteniendo las principales propiedades de la matriz.

Esta tecnología generará un plástico antifouling intrínseco, altamente bioactivo, de duración prolongada y fácilmente procesable.

El proyecto se basó en adicionar diferentes tipos de partículas de cobre a una matriz termoplástica comercial, tal como las utilizadas actualmente en la industria, para seleccionar aquellas partículas y concentra-

14 Dürr, S. & Thomason, J.C., *Biofouling* (2010).

15 Børufsen, C. *et al*, The effect of copper-treated net pens on farmed salmon and other marine organisms and sediments, 2009; Hardy Bankenhol, gerente de administración, Empresa Puertos y Redes; Benjamin Holmes, gerente de operaciones, Empresa Yadrán (2013).

ciones que permitan controlar de mejor manera la tasa de liberación de los iones de cobre.

Una vez seleccionadas los mejores materiales para este fin, se estudiaron sus propiedades antifouling para finalmente construir los prototipos. La gran ventaja de esta metodología es poder utilizar tecnologías de procesamiento tradicionales para este tipo de materiales termoplásticos y, por tanto, el proceso de producción es sencillo de externalizar.

Para las salmoneras, la utilización de este producto significará un gran ahorro en costos de limpieza y mantención, junto con un proceso ambientalmente más favorable debido a la liberación controlada reducida del ion cobre.

Participan en este proyecto CopperBiocare (Chile), el Institut de la Corrosion (Francia) y el laboratorio de Polymeric Materials del Institute for Chemical Technology del Karlsruhe Institute of Technology (KIT, Alemania).

2.9. Plásticos con cobre para reducir infecciones

Otra innovación del CIMAT se originó con el aporte de Innova de Corfo. Los investigadores desarrollaron nuevos materiales bactericidas basados en polímeros con partículas de cobre para disminuir las infecciones intrahospitalarias.

Se abrió la posibilidad de innovar en materiales plásticos que posean propiedades bactericidas y que puedan reemplazar tanto en objetos como superficies de contacto convencionales. La gran ventaja de este emprendimiento son los más bajos costos del plástico en comparación a láminas de cobre metálico o sus aleaciones y, ciertamente, su más fácil manufactura.

Por tal motivo, se emplearon los llamados termoplásticos, que se ablandan con el calor (manufactura) y se endurecen con el frío (producto final).

Las nanopartículas de cobre no están incluidas en el registro de la EPA. Sin embargo, como parte de esta investigación aplicada, se incluyeron pruebas microbiológicas de acuerdo a la norma ISO 22196 que validan el poder de este metal como potente bactericida a escala nano.

Por este motivo, el CIMAT investiga diversos materiales plásticos con nanopartículas de cobre en condiciones ambientales comunes en los hospitales. Los investigadores estudiaron una tecnología capaz de producir termoplásticos con nanopartículas de cobre que posean propiedades bactericidas prolongadas, con amplio espectro de acción y que se puedan aplicar en el área de la salud como complemento a las políticas de higiene convencionales.

Para ello, mezclaron por un método de fundido una matriz termoplástica con partículas de cobre metálico de características nanométricas a diferentes concentraciones. Se estudiaron diversas cepas de bacterias

en condiciones similares a las encontradas en hospitales y/o clínicas, en particular baja humedad total.

De esta manera, se consiguió una formulación óptima para producir un material capaz de eliminar las bacterias causantes de las infecciones intrahospitalarias o adquiridas.

Además se estudiaron diferentes matrices poliméricas para hallar aquella que facilite la acción de las nanopartículas. Al igual que la innovación anterior, una de las características más relevantes de la tecnología desarrollada es que puede ser escalada y utilizada en los equipos industriales tradicionales de procesamiento de materiales termoplásticos, lo que facilita su transferencia al mercado.

El proyecto buscó financiar actividades de investigación aplicada y la generación de un prototipo tecnológico experimental con características técnicas que generen un impacto positivo sobre las infecciones intrahospitalarias. Posteriormente, se realizó un estudio de valorización del mercado y de protección de propiedad intelectual para solicitar la patente de la tecnología.

“Como parte de esta innovación desarrollada en Chile, la empresa CopperBioHealth se encuentra realizando pruebas de fabricación con los polímeros con nanopartículas de cobre, en diversos muebles hospitalarios, que van, por ejemplo, desde barandas de cama hasta veladores”.

¿Cómo actúa el cobre?

Los mecanismos biológicos asociados a la capacidad bactericida del cobre todavía no están totalmente dilucidados.

El cobre es un nutriente esencial para la vida del hombre y de cualquier ser vivo. Sin embargo, numerosos estudios sugieren que altas concentraciones de este metal tienen efectos adversos sobre las bacterias, que son unicelulares, o sea, conformadas por una sola célula. En estos microorganismos el cobre presente en el ambiente que los rodea se une directamente a su delgada membrana celular, lo que facilita su entrada al interior de las células. El metal, además, actúa activamente debido a que esta estructura de las bacterias es parte esencial para el intercambio de nutrientes y desechos con su entorno.

En el ser humano, en cambio, el transporte del cobre a través de las membranas de las células es más complejo. Estas barreras están compuestas por una doble membrana y, por lo mismo, esta es muy selectiva a lo que entra o sale de ella. Además, la epidermis, la capa más externa de la piel, está compuesta en su mayoría por células muertas. Por estas razones, a la piel no penetra más que el 0,03% del metal en contacto con ella, sin causar daño alguno.

El cobre actúa activamente sobre las bacterias; primero en sus membranas y luego al interior de estos diminutos microorganismos. Este metal, en contacto con el oxígeno, se transforma alternadamente en óxido

cuproso y óxido cúprico. Ambos compuestos forman una capa sobre la estructura cristalina del metal o sus aleaciones y van liberando iones positivos de cobre, es decir, Cu^{+2} . Tales iones, ávidos por aparearse con electrones para neutralizar su carga, se unen a los lípidos y las proteínas de la membrana celular de las bacterias.

El Cu^{+2} entonces roba electrones a estas moléculas y, por tanto, se oxidan, constituyendo este caso el primer daño externo que ejerce este metal. Las membranas cambian su composición y, al hacerlo, se crea un desbalance en la entrada y la salida de minerales —sodio y potasio—, clave para su normal funcionamiento. El metal ingresa por aquellos espacios alterados de la membrana celular de las bacterias, iniciando una cascada de eventos que termina por causar daños irreparables y definitivos, impidiendo su sobrevivencia.

Al interior de la bacteria, en el citoplasma, el cobre se fija en los sitios de unión de las proteínas que le confieren su actividad biológica y desplaza al metal que originalmente formaba parte de esa estructura. Debido a este mecanismo, las proteínas pierden su rol, al igual como sucedería si en el sitio activo de la hemoglobina se reemplazara el hierro, el elemento que le permite transportar el oxígeno de la sangre. Y esta “dislocación química” es definitiva, porque altera la síntesis de las proteínas y estas resultan defectuosas.

Estas grandes moléculas, conformadas por muchos ladrillos (aminoácidos), determinan la estructura de cualquier tipo de organismo y, principalmente, operan como enzimas, que son las que median para que las reacciones químicas ocurran.

Con respecto a la acción adversa del cobre sobre el ADN de las bacterias, hay estudios que descartan esta posibilidad y otros que la apoyan como mecanismo directo. En cualquier caso, no hay riesgo para el ADN humano, porque los alimentos son la única vía de entrada del cobre. El intestino absorbe ínfimas dosis del metal y el hígado lo almacena para entregar, según las necesidades, este componente fundamental para la salud del hombre¹⁶.

2.10. Formación de talentos

El CIMAT congregó a una importante masa crítica de físicos, ingenieros, químicos, biólogos, matemáticos y veterinarios motivados por un interés común: generar nuevo conocimiento en la ciencia de los materiales.

Este centro multidisciplinario de excelencia formó una red internacional con alto reconocimiento en el área, la que atrajo como un imán a un número significativo de alumnos de pregrado y posgrado (doctorado y magíster), tanto de Chile como del resto del mundo.

16 ICA, Codelco, Untec e Innova Chile de Corfo (2010). Libro *Cobre antibacteriano: científicamente comprobado* (pp. 8-9).

Paralelamente, concitó el interés de muchos alumnos de posdoctorados e investigadores provenientes de América Latina, Estados Unidos y Europa que llegaron a trabajar al CIMAT.

Además, muchos estudiantes chilenos y extranjeros hicieron en sus laboratorios pasantías de verano, oportunidad que ofrece todos los años la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile en esta área y otras.

Todos sus alumnos participaron en la enriquecedora comunicación de este centro y se les daba rienda suelta a sus ideas tanto para estimularlos como para guiarlos en su formación.

Con el término del FONDAP, los integrantes del CIMAT se dispersaron, pero cada uno sigue siendo exitoso en sus respectivas líneas de investigación, incluso abriendo otras nuevas, ciertamente con distintos fondos estatales y empresariales. Al mismo tiempo, estos científicos están generando un círculo virtuoso en la formación de nuevos talentos en el área.

Además, como este centro destacó por su gran envergadura, amplió claramente los horizontes académicos y laborales de sus estudiantes tanto nacionales como internacionales. Muchos de quienes hicieron su posgrado en el CIMAT hoy están contratados por las universidades o trabajan, sobre todos los extranjeros, en centros de investigación y empresas.

Actualmente, los alumnos de pre o posgrado interesados en esta área del conocimiento pueden tener acceso a esta formación sin la necesidad de modificar mallas curriculares obligatorias, sino a través de mecanismos flexibles que funcionan mejor cuando se orientan a las propias capacidades y motivaciones.

A la fecha existe en nuestro país un grupo de científicos competitivos a nivel mundial en el área de la ciencia de los materiales, pero todavía es cuantitativamente reducido para que sea sustentable en el tiempo.

2.11. Conclusiones y recomendaciones

El desarrollo de diversos proyectos de gran impacto tecnológico en el país y las importantes innovaciones logradas ocurrieron por el gran acierto del Estado al crear un fondo de esta naturaleza que fue adjudicado al CIMAT.

Las grandes apuestas tecnológicas se pudieron hacer por el significativo aporte que entregó el Estado a largo plazo para realizar mucha investigación nueva y de alta calidad. Este tiempo, diez años, permitió tener los resultados que recién ahora se pueden observar. Por tanto, para que existan centros exitosos como el CIMAT se requiere ciencia, fondos estables y tiempo.

El CIMAT es un buen ejemplo al demostrar que la ciencia puede contribuir al desarrollo económico competitivo del país con el esfuerzo concertado del Estado, las universidades y las empresas.

Este centro sirvió de paraguas para que su quehacer en la ciencia de los materiales creara nexos con el sector industrial (nacional y extranjero) y recibiera también de este aportes en los proyectos de investigación tecnológica.

El apoyo del FONDAP, junto con la participación de tres universidades, permitió contar con la necesaria infraestructura física, equipamientos y laboratorios para hacer investigación competitiva internacionalmente en esta área de la ciencia, en esencia, experimental.

Actualmente, los laboratorios que han servido en el quehacer del CIMAT reciben continuamente visitas de investigadores y estudiantes, tanto chilenos como extranjeros, para trabajar en ellos.

En este mismo contexto, con el FONDAP se pudo adquirir nuevo equipamiento y tener a la vez el suficiente presupuesto para aquellos análisis de muestras que debieron enviarse al extranjero por el requerimiento de equipos altamente sofisticados.

El centro tuvo importante acercamiento con las industrias y, sobre todo, credibilidad, lo que no es sencillo entre dos mundos con distintos lenguajes, objetivos y tiempos. De alguna manera esta interacción quizás propicie en las empresas la contratación de jóvenes investigadores que actúen como interlocutores entre ambas partes.

Esta es una situación pendiente en Chile, la que demanda un cambio de cultura entre los ámbitos académicos y productivos a través de una política de Estado que incentive este necesario nexo.

Sin embargo, esta brecha actual en el país entre científicos y empresarios no solo se pudo superar en los 10 años de vida del CIMAT, sino que se aprendió a conversar para llevar exitosamente adelante los proyectos y, sobre todo, a escalonarlos, o sea, replicar los resultados a escala industrial.

En esta experiencia contribuyó notablemente la presencia de un integrante del equipo científico del CIMAT, que trabajó por mucho tiempo como consultor internacional y en I+D de empresas de Brasil como Petrobras.

Por otra parte, la curiosidad científica estuvo siempre presente ante el desafío permanente que demandaba la industria por el desarrollo de nuevos materiales plásticos resistentes y duraderos, entre otras propiedades.

Si bien el CIMAT nació para generar nuevo conocimiento científico, fueron las instancias de diálogo con las empresas las que condujeron al desarrollo de proyectos e investigaciones aplicadas. Gracias a las actividades de difusión realizadas por el CIMAT y por los investigadores, se facilitó a muchos nuevos emprendedores la creación de sus propias empresas.

Tales importantes emprendimientos nacionales que hoy ya cruzan fronteras pueden competir exitosamente en el mercado por la I+D+i que entregó el CIMAT. Esta fórmula necesariamente debería entonces convertirse en I+D+i+e si las metas son grandes y ambiciosas.

La red internacional que consiguió el CIMAT en la ciencia de los materiales y que se mantiene hasta el presente le entregó un valioso recono-

cimiento. A esta fortaleza se suma su alta publicación científica y número de patentes presentadas y algunas concedidas, tanto financiadas como tramitadas a través de la Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo de la Universidad de Chile, en algunos casos con aportes de Innova Corfo, FONDAP y la asesoría de la empresa de transferencia tecnológica NEOS.

En tal sentido, fue relevante en la evolución del CIMAT contar con un comité de expertos internacionales en el área para evaluar su desempeño. Una vez al año y durante tres días se analizaba con ellos las distintas ideas, de modo de descartar algunas e impulsar las mejores.

En las innovaciones del CIMAT fue crucial adquirir las propiedades intelectuales, lo que da valor a las instituciones como la Universidad de Chile y alta probabilidad de beneficio a la sociedad. Lo importante es asegurar que la generación de nuevo conocimiento quede aquí y, sobre todo, aprender a explotarlo.

Sin embargo, nuestro país sigue siendo un actor bastante pequeño en el contexto internacional, representando solo el 0,1% de las patentes concedidas. Según información de la Organización Mundial de Propiedad Intelectual (OMPI), al 2011 estas fueron 104 chilenas, 909 empresas extranjeras en Chile y 93 en el extranjero. En el mismo año, 118 patentes fueron presentadas al PCT.

En cuanto a las patentes presentadas en 2011, los residentes del país presentaron 339 patentes; las empresas extranjeras 2.453 patentes, y en el extranjero coincidentemente 339 patentes.

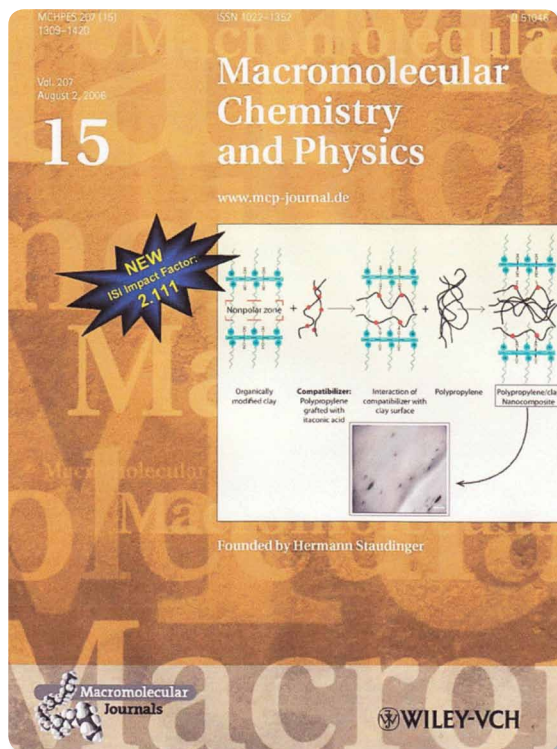
De acuerdo a información proporcionada por el Instituto Nacional de Propiedad Intelectual (Inapi), con respecto al *ranking* de solicitudes de patentes por parte de las universidades chilenas, de un total de 468 presentadas por residentes en el país entre 2000-2009 lideran la Universidad de Concepción (80), la Universidad Técnica Federico Santa María (50), la Universidad de Chile (38), la Universidad Católica de Chile (34) y la Universidad de Santiago (33).

Entre 2005 y 2012, la Universidad de Chile presentó 50 patentes; con 39 en tramitación y 23 aprobadas. En igual período, esta casa de estudios superiores presentó en países del extranjero 156 patentes, con 98 en tramitación y 34 aprobadas¹⁷.

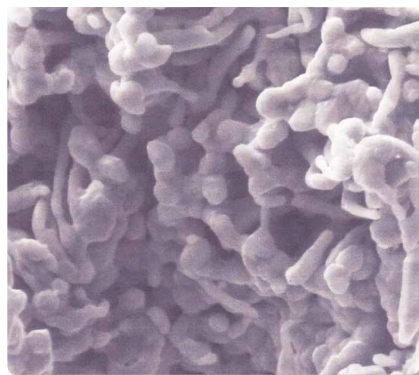
Un hecho importante por resolver es flexibilizar la administración pública chilena de centros complejos como el CIMAT y que operan a nivel internacional. Se hace necesaria una mayor independencia en la generación de políticas y en el manejo de presupuestos.

En tal caso, sería prudente pensar que centros como el CIMAT tuvieran estructura jurídica propia, pero siempre protegiendo los intereses de la institución que lo acoge, en este caso, la Universidad de Chile. Las universidades no estatales o privadas, en contraste, simplifican la demanda burocrática y agilizan con creces los procesos.

17 Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo (2013).



Revista Macromolecular Chemistry and Physics (2006): La portada muestra una representación esquemática de la preparación de nanocompuestos de arcilla y polipropileno, usando este polímero ácido itacónico como compatibilizante de cobre como aditivos en matrices poliméricas.



Partículas de cobre: Imagen tomada por microscopía electrónica de partículas de cobre como aditivos en matrices poliméricas.



Ensayo clínico: Baranda con cubrimiento de cobre metálico en una cama de Unidad de Cuidado Intensivo del Hospital Doctor Salvador Allende de Calama (CODELCO).

**Antimicrobial
Copper**

Cu⁺

Marca registrada del cobre: "Antimicrobial Copper Cu⁺" lanzada por la International Copper Association (ICA) en 2010.

Información técnica del proyecto

Caso 1:

Patente 1: Patente para el uso de relleno de cáscara de huevo.

Financiamiento	Fuentes	CIMAT
	Montos	USD 200.000
Tiempo involucrado (desde la idea a la innovación)	3 años	
Patentes o registros de protección industrial (INDICAR QUÉ TIPO DE PROTECCIÓN SE REALIZÓ)	Solicitudes (n° de solicitudes)	Nacionales:
		Internacionales:
	Concesiones (n° de Patentes)	Nacionales: N°46350, 2010
		Internacionales: US 11/239,539, 2008
Investigadores/gestores	José Luis Arias Bautista, Raúl Quijada, Patricio Toro, Mehrdad Yazdani-Pedram	
Industria que adoptó la innovación		
Inversión en la innovación		

Publicaciones asociadas:

- 1) “Eggshell, a New Bio-filler for Polypropylene Composites”. P. Toro, R. Quijada, M. Yazdani-Pedram, J. L. Arias, Materials Letters, 61, 4347-4350 (2007).
- 2) Morphological Studies of Poly(propylene)-Filled Eggshell Composites”. P. Toro, R. Quijada, J. L. Arias, M. Yazdani-Pedram. Macromolecular Materials and Engineering, 291, 1027-1034, (2007).

Patente 2 : Compatibilizante

Financiamiento	Fuentes	CIMAT Braskem
	Montos	USD 200.000
Tiempo involucrado (desde la idea a la innovación)	3 años	
Patentes o registros de protección industrial (INDICAR QUÉ TIPO DE PROTECCIÓN SE REALIZÓ)	Solicitudes (n° de solicitudes)	Nacionales:
		Internacionales:
	Concesiones (n° de Patentes)	Nacionales: CL2729-2006 N° 47986
		Internacionales: N°33746, año 2011
Investigadores/gestores	Raul Quijada, Patricio Toro, Mehrdad Yazdani-Pedram	
Industria que adoptó la innovación	Braskem	
Inversión en la innovación	USD70,000 Existen empresas dispuestas a financiar la investigación de la aplicación en otros tipos de polímeros y elastómeros.	

Publicaciones asociadas:

- 1) "Use of PP Grafted with Itaconic Acid as new Compatibilizer for PP/ Clay Nanocomposites". E. Moncada, R. Quijada, I. Lieberwirth, M. Yazdani-Pedram. Macromol. Chem. Phys., 207, 1376-1386, (2006).
- 2) "Use of Functionalized Metallocene Copolymers from Ethylene and Polar Olefins as Compatibilizers For LDPE/Starch and LDPE/Dextran Blends", A. M. Domínguez, R. Quijada, M. Yazdani-Pedram. Macromol. Mater. Eng., 291, 962-971, (2006).

Patente 3: Arcilla híbrida

Financiamiento	Fuentes	UNIVERSIDAD DE CHILE-NEOS LTDA 2008
	Montos	USD 200.000
Tiempo involucrado (desde la idea a la innovación)	3 años	
Patentes o registros de protección industrial (INDICAR QUÉ TIPO DE PROTECCIÓN SE REALIZÓ)	Solicitudes (n° de solicitudes)	Nacionales:
		Internacionales: Brasil (Abril 2009) Comunidad Europea (Abril 2009)
	Concesiones (n° de Patentes)	Nacionales: N° 47385
		Internacionales: En EE.UU. N° 33746
Investigadores/gestores	Raúl Quijada, Patricio Toro, Mehrdad Yazdani-Pedram	
Industria que adoptó la innovación		
Inversión en la innovación		

Publicaciones asociadas:

- 1) "Polypropylene/Clay Nanocomposites: Effect of the use of Different Clays and Compatibilizers on their Morphology". H. Palza, R. Vergara, M. Yazdani-Pedram, R. Quijada. Journal of Applied Polymer Science, 112, 1278-1286 (2009).
- 2) "Poly 484-Preparation and characterization of polyamide/montmorillonite nanocomposites". Dognac, V., Quijada, R. Abstracts of paper of the American Chemical Society. Dognac, V., Quijada, R. Vol. 238, Meeting Abstract: 484-Poly Published: Aug., 16, 2009.

Patente 4: Nanoarcillas de origen volcánico

Financiamiento	Fuentes	UNIVERSIDAD DE CHILE
	Montos	USD 200.000
Tiempo involucrado (desde la idea a la innovación)	3 años	
Patentes o registros de protección industrial (INDICAR QUÉ TIPO DE PROTECCIÓN SE REALIZÓ)	Solicitudes (n° de solicitudes)	Nacionales:
		Internacionales: Comunidad Europea EP07825319.2, Marzo 2013. China N° 200780042905.3 (28/12/2012) USA, Brasil, India, China (Abril 2009)
	Concesiones (n° de Patentes)	Nacionales: N° 47.986
		Internacionales:
Investigadores/gestores	Raúl Quijada, Patricio Toro, Mehrdad Yazdani-Pedram, Edwin Moncada	
Industria que adoptó la innovación		
Inversión en la innovación		

Publicaciones asociadas:

- 1) "Use of PP Grafted with Itaconic Acid as new Compatibilizer for PP/Clay Nanocomposites". E. Moncada, R. Quijada, I. Lieberwirth, M. Yazdani-Pedram. *Macromol. Chem. Phys.*, 207, 1376-1386, (2006).
- 2) "Use of Functionalized Metallocene Copolymers from Ethylene and Polar Olefins as Compatibilizers For LDPE/Starch and LDPE/Dextran Blends", A. M. Domínguez, R. Quijada, M. Yazdani-Pedram. *Macromol. Mater. Eng.*, 291, 962-971, (2006).

Patente 5: Sol-Gel

Financiamiento	Fuentes	CIMAT
	Montos	
Tiempo involucrado (desde la idea a la innovación)	3 años	
Patentes o registros de protección industrial (INDICAR QUÉ TIPO DE PROTECCIÓN SE REALIZÓ)	Solicitudes (n° de solicitudes)	Nacionales: Chile
		Internacionales: En EE.UU N° 26868, July 2009. Brasil
	Concesiones (n° de Patentes)	Nacionales:
		Internacionales:
Investigadores/gestores	Raúl Quijada, Edwin Moncada	
Industria que adoptó la innovación		
Inversión en la innovación		

Publicaciones asociadas:

- 1) Preparation of poly(ethylene-co-dicyclopentadiene) copolymers and a study on their post polymerization epoxidation”. Peoples, B. C., Galland, G. B. and Quijada, R. Polymer Bulletin 70(1). pp.117-129, 2013.
- 2) “Silica/clay organo-heterostructures to promote polyethylene-clay nanocomposites by in situ polymerization” Zapata, P.A., Belver, C., Quijada, R., Aranda, P., Ruiz-Hitzky, E. Applied Catalysis A: General 453, pp. 142-150, 2013.

Caso 2: Polímeros con partículas de cobre

Financiamiento	Fuentes	CIMAT
	Montos	USD 400.000
Tiempo involucrado (desde la idea a la innovación)	3 años	
Patentes o registros de protección industrial (INDICAR QUÉ TIPO DE PROTECCIÓN SE REALIZÓ)	Solicitudes (n° de solicitudes)	Nacionales: CL 2012-03479
		Internacionales:
	Concesiones (n° de Patentes)	Nacionales:
		Internacionales:
Investigadores/gestores	Humberto Palza, Raúl Quijada, Katherine Delgado, Ivette Pinochet	
Industria que adoptó la innovación	Industria de la salud, textil, construcción y consumo masivo.	
Inversión en la innovación	<i>Sí, existen empresas que están interesados en financiar proyectos de investigación aplicada para aplicaciones en instalaciones hospitalarias y productos de venta masiva. Los proyectos se estiman en USD80,000.</i>	

Publicaciones asociadas

- 1) "Toward Tailor-made Biocide Materials based on Polypropylene/Copper Nanoparticles". H. Palza, S. Gutiérrez, K. Delgado, O. Salazar, V. Fuenzalida, J. Ávila, G. Figueroa, R. Quijada. Macromolecular Rapid Communication, Vol. 31, 563-567 (2010).
- 2) "Polypropylene with embedded copper metal or copper oxide nanoparticles as a novel plastic antimicrobial agent", Delgado, K., Quijada, R., Palma, R., et al. Letters in Applied Microbiology, Vol. 53, 1, pag. 50-54 (2011).

ÁREA ENERGÍA

Desarrollo de un sistema de correa transportadora con capacidad para regenerar energía eléctrica

Rodrigo Palma (Coordinador),

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,
Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Juan C. Araneda,

Transelec, Santiago, Chile.

Walter Brokering,

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,
Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Guillermo Jiménez,

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,
Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Luis Morán,

Facultad de Ingeniería,
Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

Hugh Rudnick,

Facultad de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Resumen

A partir de una breve descripción del sector energético nacional, junto con los elementos centrales de su desarrollo histórico, se presenta una definición del término “innovación”, determinando el alcance del concepto de creación de riqueza. Las innovaciones en el sector se distinguen entre aquellas de perfil tecnológico, de mejoras en la gestión del sector, o bien de optimización de procesos.

En este artículo se selecciona un ejemplo específico, para el cual se ha privilegiado presentar una experiencia que plantee una solución tecnológica, asociada a desarrollos innovadores de equipamientos, que pueda ser considerada como un caso de éxito en el sector, más allá de soluciones de gestión de éste. Esta experiencia corresponde al desarrollo de un sistema de correa transportadora de material para Minera Los Pelambres con la capacidad de regenerar energía eléctrica.

Este desarrollo buscó proponer una solución tecnológica novedosa que permitiera aprovechar la energía requerida para el frenado de la correa transportadora del material procesado en la Minera Los Pelambres. Lo anterior como consecuencia de la diferencia de altura (energía potencial), con una pendiente promedio del 11 % entre el lugar de extracción y de entrega del material. Si bien el sistema de frenado regenerativo de correas transportadoras se había desarrollado con anterioridad al proyecto de Minera Los Pelambres, las características propias del proyecto permitieron crear innovación al optarse por un accionamiento eléctrico de velocidad variable y control continuo de torque (control vectorial), respecto a uno discreto con rotor bobinado con pérdida de control continuo de torque, y que mantuviera la misión de frenado a plena carga y detención controlada ante un corte de suministro.

Esta innovación corresponde a un bien privado, aprovechado por la empresa minera Los Pelambres y la empresa creadora de la solución tecnológica (consorcio Siemens-ThysenKrupp). En su desarrollo realizaron un aporte fundamental distintos investigadores nacionales, entre los que destacan los profesores Jorge Pontt y José Rodríguez, de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM).

El desarrollo contó con financiamiento privado, complementado con aportes de Fondef y Fondecyt, principalmente, lo que permitió generar el conocimiento básico de los expertos de los centros de investigación que participaron en este proyecto. Este tipo de innovación en aplicaciones de nuevas tecnologías ha sido común a grupos de investigación en electrónica de potencia, concentrados hoy en las universidades Técnica Federico Santa María, de Concepción, PUC, USACH y de Chile, donde se ha creado una masa crítica de investigadores involucrados en distintas aplicaciones innovadoras asociadas al mundo industrial.

La propiedad intelectual e industrial de este desarrollo es del consorcio Siemens-ThysenKrupp. Sin embargo, los expertos nacionales también han emprendido procesos para patentar soluciones tecnológicas asociadas.

Estos desarrollos ponen en relieve la masa crítica que existe en Chile de expertos en electrónica de potencia y sistemas eléctricos, lo que ha permitido emprender otras innovaciones similares en aplicaciones, tales como electro-obtención de cobre, tracción eléctrica, sistemas de control en procesos mineros y otros. Además, este trabajo ha generado patentes, publicaciones y numerosas presentaciones en eventos internacionales.

El artículo discute, asimismo, la perspectiva de nuevas innovaciones que se visualizan en el ámbito energético, aprovechando las nuevas tendencias observadas producto de nuevos centros de investigación, formación de capital humano y emprendimientos empresariales.

Respecto de las recomendaciones para mejorar en forma significativa las funciones de las instituciones, las orientaciones de los instrumentos y la formación de profesionales y técnicos en las universidades, se puede concluir lo siguiente:

- Es clave mantener la tendencia de apoyo con recursos económicos significativos a los centros de investigación existentes, como los que dieron lugar a la innovación referida, creando plataformas que les permitan avanzar de una etapa de desarrollo de aplicaciones tecnológicas a una de diseño y desarrollo de equipamiento y de nuevas tecnologías, para capturar a nivel nacional el valor que hoy recogen proveedores extranjeros. Para ello se identifica la necesidad de crear capacidades de transitar desde un prototipo de laboratorio a un producto comercial, ya sea a través de mejoras en la organización de las empresas, o bien en las competencias de los profesionales involucrados.
- Identificar nichos temáticos promisorios en el área energética que permitan integrar grupos de trabajo de varias instituciones del país y apoyarlos para la formación de una masa crítica que pueda emprender nuevos desafíos en el ámbito de aplicaciones tecnológicas. Para ello se reconoce como aspecto clave mantener el contacto con la industria y con centros de investigación de primer nivel en el extranjero.
- El financiamiento de desarrollos piloto en el ámbito energético (por ejemplo, el desarrollo de un prototipo de generación mareomotriz o de filtros activos de potencia para la industria minera) se reconoce como un mecanismo eficiente para crear capacidad de innovación local de proyección mundial.

PARTE I: Aspectos generales

La Academia Chilena de Ciencias, en conjunto con la Dirección de Educación Superior del Ministerio de Educación, desarrolla un proyecto de investigación y análisis con el fin de elaborar un documento que proporcione un diagnóstico y recomendaciones acerca del estado de la innovación basada en la creación de conocimiento en Chile. La innovación es entendida, en forma general, como un instrumento de creación de riqueza.

Metodológicamente, el análisis de la Academia ha sido dividido en 11 áreas temáticas, entre las que se encuentra “energía”. Para abordar esta última temática se ha creado una comisión individualizada en la portada del trabajo, a la que se han sumado opiniones de especialistas entrevistados en el marco del estudio.

El área de energía en Chile

El concepto de “área de la energía” es sumamente amplio y contiene múltiples subcampos: producción (petróleo, carbón, electricidad, fuentes no convencionales ERNC, etc.), utilización (industria, minería, distribución eléctrica, transporte, etc.), manejo económico (tarifas, planificación, inversiones, gestión, etc.), y control de sistemas e instalaciones (despacho de energía eléctrica, control de equipos mineros, etc.). Por ello, resulta difícil hacer una presentación general del tema.

En el área de producción de energéticos es posible indicar que en Chile prácticamente no hay petróleo ni gas natural y que el carbón existente es de bajo poder calorífico y de alto contenido de azufre. La hidroelectricidad es relativamente abundante, pero su explotación está enfrentando creciente oposición ciudadana. La energía eólica es abundante en zonas específicas y está en fase inicial de desarrollo en Chile, habiendo superado recientemente los 300 MW de capacidad instalada. La energía solar es abundante en el Norte Grande, pero enfrenta desafíos respecto de los costos de desarrollo y bajo factor de planta.

Innovación en el área de energía

Como se trata de presentar un caso en el que haya existido innovación, corresponde comenzar definiendo lo que entenderemos por innovación, más allá de ser una creación de riqueza basada en avances en el conocimiento existente en Chile.

De acuerdo con el diccionario, innovar es “mudar o alterar las cosas, introduciendo novedades”. Sin embargo, restringiendo un poco esta definición, la mutación o alteración debe implicar una mejora, ya sea en las etapas de producción, utilización o manejo económico y de gestión de la energía. Como consecuencia, hay una creación de riqueza. La Academia Chilena de Ciencias impone además la condición de que la mejora esté basada en una creación de conocimiento en Chile.

La energía es un área transversal, donde la innovación se da principalmente en el área de la ingeniería (eléctrica, mecánica, química, hidráulica, industrial, construcción), aunque también participan otras disciplinas, como arquitectura y química.

La innovación en el área de la energía, como creación de valor local, ha estado focalizada principalmente en el área industrial (de consumo energético) y en el ámbito universitario. Las contribuciones han estado concentradas en mejoras de procesos, uso de energéticos y en la integración de equipos y tecnologías extranjeras. El ejemplo de innovación específico elegido demuestra esta colaboración conjunta entre industria minera y academia. En cambio, las empresas energéticas (eléctricas, petroleras y gasíferas) tradicionalmente han sido importadoras y adaptadoras de tecnologías, con limitadas innovaciones a nivel nacional. Sus

esfuerzos innovadores han estado más bien en el ámbito de las aplicaciones, de la gestión y de la mejora en su valor económico.

Por las condiciones que se dan en el país, debemos entender también que la creación de riqueza tiene un carácter general, y que ella no siempre va en beneficio económico de sus autores.

Desarrollo histórico y ejemplos

Si bien en Chile siempre se ha optimizado el uso y costo de aprovechamiento de los recursos para la producción de energía, en ninguno de estos campos, como se indicara, se han desarrollado innovaciones tecnológicas importantes. Los equipos empleados en el sector energía en Chile han sido tradicionalmente diseñados y fabricados fuera del país, de manera que es muy difícil aplicar innovaciones en ellos, salvo en la manera de armar el conjunto. Las innovaciones han sido limitadas en la utilización de los recursos energéticos, donde los equipos empleados son a menudo estándar y los mejoramientos siguen la tendencia mundial.

En el campo del manejo económico de la energía sí que ha habido innovación, e innovación de trascendencia mundial. Efectivamente, al inicio de los años 80, Chile planteó una reforma estructural pionera del sector energético eléctrico, que a nivel mundial se había desarrollado en un contexto de empresas eléctricas integradas verticalmente a lo largo de toda la cadena generación-consumo. Estas empresas trabajaban en un contexto privado, estrechamente reguladas, o, como en la mayor parte de América Latina, en un contexto estatal, con una participación limitada de los privados en el ámbito de la distribución. La reforma planteó una nueva visión desintegrada de la cadena, donde se formulaba el desarrollo de un mercado competitivo de generación, en que diversos actores generadores, estatales y privados, compiten en el suministro de electricidad. Como actividades desintegradas verticalmente se segmentaban la transmisión y distribución, que por sus características económicas se desarrollarían como monopolios regulados por el Estado. Todo esto, bajo un marco de tarificación marginalista, cuya teoría se había formulado en Francia en la década de 1950. Esta reforma innovadora fue seguida por el Reino Unido en 1989, luego por la mayoría de los países de América Latina en la década de 1990, para luego extenderse a nivel mundial. Si bien esta reforma no estaba condicionada por innovaciones tecnológicas, ni originó adelantos tecnológicos propiamente tales, implicó desarrollar soluciones propias en el ámbito de la tarificación de los sistemas de transmisión (esquemas de peajes por uso de instalaciones) y distribución (esquema de empresa modelo y valor agregado de distribución, VAD). También exigió desarrollos regulatorios específicos al nuevo modelo desintegrado, en particular en el ámbito de la coordinación de la operación de la generación y en el uso de metodologías matemáticas y computacionales de optimización de la planificación y operación de sistemas

eléctricos de potencia bajo incertidumbre hidrológica, múltiples embalses y una red de transmisión de extensa longitud y capacidad limitada.

Si bien esta comisión reconoce la importancia mundial de esta innovación en el ámbito de la gestión y tratamiento económico de los sistemas eléctricos, privilegió identificar contribuciones que presentaran una componente tecnológica, específicamente asociada al desarrollo de equipamiento innovador.

Endesa fijó un referente internacional a través del desarrollo de estándares de diseño sísmico para la construcción de equipos eléctricos. Similarmente, aunque vinculado al área civil más que al área energética, cabe destacar su aporte en el diseño sísmico en la construcción de centrales hidráulicas de embalse.

En el ámbito eléctrico se destacan ejemplos de innovación en el país en el campo de la electrónica de potencia y del control automático. En efecto, a partir de la introducción de estos temas en nuestras universidades (década de 1960), ha habido un permanente contacto de los expertos universitarios con las empresas industriales y mineras, y más particularmente con estas últimas, necesitadas de equipos especiales para aplicaciones específicas. En este ámbito se ha seleccionado un caso exitoso de desarrollo de equipamiento en el sector minero, que se detalla en la segunda parte de este documento.

Estado actual de desarrollo

En la última década, se observan a nivel nacional la formulación y la ejecución de distintos desarrollos tecnológicos que podrían proyectarse como innovaciones de relevancia:

- Soluciones de microrredes de generación para el suministro costo-efectivo en zonas urbanas y rurales. Estos desarrollos han sido liderados por universidades, destacando Huatacondo (Universidad de Chile), como la primera microrred en Chile con estas características (www.centroenergia.cl).
- Sistemas especiales de protección eléctrica, desarrollados por empresas del sector como Conecta (www.conecta.cl).
- Integración de filtros activos, convertidores multinivel y multietapa, ultracapacitores y baterías especiales en el transporte eléctrico (Pontificia Universidad Católica de Chile (<http://web.ing.puc.cl/~power/publications/electronics.htm>) y Universidad de Concepción (www.die.udec.cl/~lcse)).
- Uso de algas para la producción de biodiésel (empresas E-CL, Gas Atacama en conjunto con centros de investigación nacionales y extranjeros).
- Sistema automático de identificación de consumos eléctricos (Pontificia Universidad Católica de Chile).

- Central de bombeo con agua salada orientada a la compensación de la ERNC de carácter variable, como la eólica y solar. Este proyecto, aún en su fase conceptual, es liderado por la empresa chilena Valhalla (<http://futureenergy.ultralightstartups.com/campaign/detail/1027>).

Estas innovaciones se formulan en tendencias tecnológicas a nivel mundial, y están presentes en publicaciones de los desarrolladores en revistas y congresos internacionales.

Cabe destacar que la innovación en equipamiento eléctrico requiere de recursos importantes de laboratorios avanzados de investigación, además de significativos recursos humanos, que históricamente no han estado presentes en los centros de investigación en el país. Los recursos, muy limitados, provienen inicialmente de estos mismos centros. Luego surge el financiamiento de investigación por parte del Estado, fundamentalmente a través de Conicyt, que se formula mediante proyectos de recursos acotados, principalmente orientados a apoyar a investigadores y alumnos (un ejemplo importante ha sido el Fondecyt), y solo para la adquisición de equipamiento menor. Por lo tanto, en el pasado la innovación ha estado focalizada en áreas que requieren inversiones limitadas en laboratorios, principalmente en el ámbito de la electrónica de potencia y el control automático, campos que, como se indicara, han tenido especial desarrollo. Cabe destacar que, en general, tampoco existe en el país una industria consciente del valor de la investigación e innovación para su propia subsistencia y competitividad, y por ende de la importancia de su aporte financiero.

Perspectivas de desarrollo

El incremento de los recursos orientados a investigación de la última década, entre otros originados en el royalty minero, está permitiendo el fortalecimiento de los grupos de investigación existentes y la creación de nuevos grupos de investigación multidisciplinarios y multiinstitucionales en energía. Se suma a esto un voluminoso aporte a un sistema de becas de posgrado en el extranjero, que está incrementando la capacidad de investigación e innovación de los investigadores nacionales del sector energía. Por último, los esfuerzos del Estado en el ámbito del estímulo de la innovación están condicionando un creciente interés de los egresados universitarios en incursionar en ello. Estos factores anticipan una proyección positiva de la innovación en el ámbito energético. Cabe destacar iniciativas como el Fondef, las acciones de Corfo en la atracción de centros de excelencia (CSIRO, Inria), la creación del Fondap (con el proyecto del Centro Solar) y el concurso CSP (Corfo, Ministerio de Energía), entre otros.

Lo anterior está además facilitando la formación de centros de energía en varias instituciones del país (Universidad de Chile, Universidad Técnica Federico Santa María, Universidad Adolfo Ibáñez) y el fortale-

cimiento de redes internacionales de centros de investigación en energía. La tabla 1¹ lista algunos de los centros de innovación energética en el país.

Se suma a lo anterior un interés creciente, aunque generalmente incipiente, de la industria por aportar recursos financieros a la investigación e innovación, más allá de las aplicaciones directas a sus procesos productivos.

Tabla 1: Centros de innovación energética en el país

Centros	Año creación	Número investigadores	Institución	Director
Centro de Cambio Global	2009	3	Pontificia Universidad Católica de Chile	Francisco Meza
Centro de Energía	2009	16	Universidad de Chile	Rodrigo Palma
Centro de Energía y Desarrollo Sustentable	2009	s/i	Universidad Diego Portales	Edmundo Claro
Centro de Investigación de Carbones Magallánicos	2009	s/i	Universidad de Magallanes	Juan Carlos Moreno
Centro de Innovación Energética	2008	12	Universidad Técnica Federico Santa María	Jaime Espinoza
Centro Regional de Investigación de Energía y Aguas	2006	s/i	Universidad de Tarapacá	Raúl Sapiain
Centro de Desarrollo Energético de Antofagasta	s/i	5	Universidad de Antofagasta	Edward Fuentealba
Centro Interdisciplinario de Energía	s/i	s/i	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso	Germán Aroca
Centro de Energía Sustentable	s/i	s/i	Universidad Austral de Chile	s/i
Centro de Estudios de los Recursos Energéticos	1993	3	Universidad de Magallanes	Humberto Vidal
Centro de Innovación en Energía	2008	5	Universidad Adolfo Ibáñez	Carlos Silva

Asimismo, de la base de datos IEEE Explore, entre los años 2001 y 2010, Chile generó 480 publicaciones de investigación en el sector energético. Por otra parte, se han desarrollado 20 patentes entre el 2000 y 2011 a nivel nacional (Inapi, 2011) en energía solar, eólica y eficiencia energética.

¹ Recopilación del Prof. Aldo Cipriano de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

PARTE II: Análisis de ejemplo específico

Introducción

En vista de la necesidad de concentrarse en un ejemplo específico, se ha decidido elegir el caso de la colaboración entre la Universidad Técnica Federico Santa María y Minera Los Pelambres, en que se definió un sistema recuperador de energía a partir del frenado de las correas transportadoras de mineral, experiencia en la que concurre la definición de una solución tecnológica novedosa con una posterior operación exitosa. La solución adoptada ha sido pionera a nivel mundial y utilizada posteriormente por Siemens A. G. en otros proyectos (Rodríguez, 2002a; Rodríguez, 2002b) (ver Figura 1).



Figura 1: Correa transportadora de Minera Los Pelambres (Ref: Siemens AG).

Para el desarrollo de esta sección se realizaron entrevistas a los siguientes especialistas que conocen de cerca el proyecto:

- Gerardo Alzamora, ex gerente eléctrico de Minera Los Pelambres,
- Jorge Pontt, académico de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Historia del proyecto

La mina de cobre Los Pelambres está situada en la cordillera de los Andes en la IV Región, comuna de Salamanca, sobre los 2.000 m.s.n.m., lo que impone altas exigencias a los equipos eléctricos utilizados. Además, y por su ubicación, enfrenta serios problemas de avalanchas. Por ello, la planta concentradora fue ubicada a cierta distancia, a menor altura. El origen de la idea se basa en el estudio de ingeniería conceptual para el proyecto minero Los Pelambres de Anaconda, realizado el año 1984, el cual consideraba un transporte del mineral en bajada, desde la mina a la planta concentradora, con una extensión de alrededor de 15 kilómetros y

una diferencia de cota de 1.500 metros. En ese estudio, la tecnología que se consideraba para accionar la correa era a base de motores de corriente continua.

Posteriormente, en 1995, durante el estudio de prefactibilidad y factibilidad, se determina mantener el concepto de diseño de proceso y ubicación de las operaciones (mina planta) y cambiar la tecnología por aquella innovadora y probada (en zonas sin pendiente) con el uso de motores de inducción con rotor jaula de ardilla y energizados por variadores de frecuencia tipo fuente de voltaje con capacidad de regeneración a través del uso de un rectificador de frente activo (AFE). Esta alternativa se escogió en vez de una ya probada en el accionamiento de correas a base de motores de inducción con rotor bobinado ya usada en Chile (Minera El Abra). La nueva tecnología seleccionada para la aplicación en Minera Los Pelambres resultó ser más eficiente, segura, rentable y sustentable, a pesar de que se aplicó a un sistema prototipo, al desarrollarse en bajada, en el cual hubo que privilegiar el frenado del sistema (Pontt, 2005). La motivación surgió de la necesidad de satisfacer la estrategia del negocio minero en términos de su disposición de planta, que obligaba a que la concentradora se ubicara finalmente a unos 13 kilómetros de distancia y a una cota inferior, de 1300 metros respecto de la mina.

Adicionalmente, en Chile existía el conocimiento y experiencia para seleccionar y asumir el compromiso de llevar a cabo esta innovación tecnológica y sin obsolescencia en el tiempo. Los resultados de esta innovación han sido exitosos y replicables tras 14 años de exitosa explotación.

Desde 1994 a 1996 se realizaron numerosos estudios técnicos, comparaciones de tecnologías y visitas a terreno en faenas mineras para ver qué tecnologías se utilizaban principalmente para el transporte de mineral a través de correas en bajada. Luego, se procedió a la confección de las especificaciones técnicas y bases de licitación del sistema, con indicadores KPI de funcionalidad y productividad efectiva, con el apoyo de consultores locales y extranjeros (RWE y Bechtel) (Rodríguez, 2005; Pontt, 2010; Pontt, 2011). A partir de 1997 y tras la llegada de las ofertas, se procedió a una exhaustiva revisión y negociación de las tecnologías ofertadas. En su desarrollo realizaron un aporte fundamental distintos investigadores nacionales, entre los que destacan los profesores Jorge Pontt y José Rodríguez, de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM).

Luego se procedió a la selección, adjudicación, fabricación, pruebas en fábrica, montaje, construcción y puesta en marcha de la correa transportadora con accionamiento regenerativo, que finalizó en el año 2000.

Aspectos específicos del proyecto

Tradicionalmente, el accionamiento de correas transportadoras se realizaba con motores de inducción del tipo rotor bobinado. Este tipo de motor tiene la particularidad de que puede controlar el torque de parti-

da conectando distintas etapas de resistencia al rotor. También, con este tipo de motor se puede devolver energía a la red, al hacer que el rotor gire a una velocidad mayor a la sincrónica. Esta alternativa se usaba en el caso de correas que tuviesen que bajar mineral (por ejemplo, correa transportadora de El Abra). Esta aplicación, si bien es efectiva, es menos eficiente que la utilizada en el proyecto de Los Pelambres. Además, presenta la desventaja de tener un control de torque discreto, que depende del número de etapas de resistencia externa que se agregue al rotor, y de requerir un importante flujo de potencia reactiva en el estator (Khambadkone, 1991).

La ventaja de la alternativa tecnológica empleada para el accionamiento de la correa transportadora de Minera Los Pelambres es que al escoger un accionamiento con rectificador de frente activo se controla el factor de potencia, limitando el flujo de potencia reactiva hacia el sistema de distribución, lo que permite una regeneración controlada de potencia activa con corriente prácticamente sinusoidal. Además, al usar un inversor del tipo fuente de voltaje, con modulación de ancho de pulsos, y control vectorial se puede lograr un ajuste fino del valor de torque y velocidad de cada motor (Novotny, 1996). En la siguiente figura se resume la innovación descrita en el contexto del estado del arte en el tema (ver Figura 2):

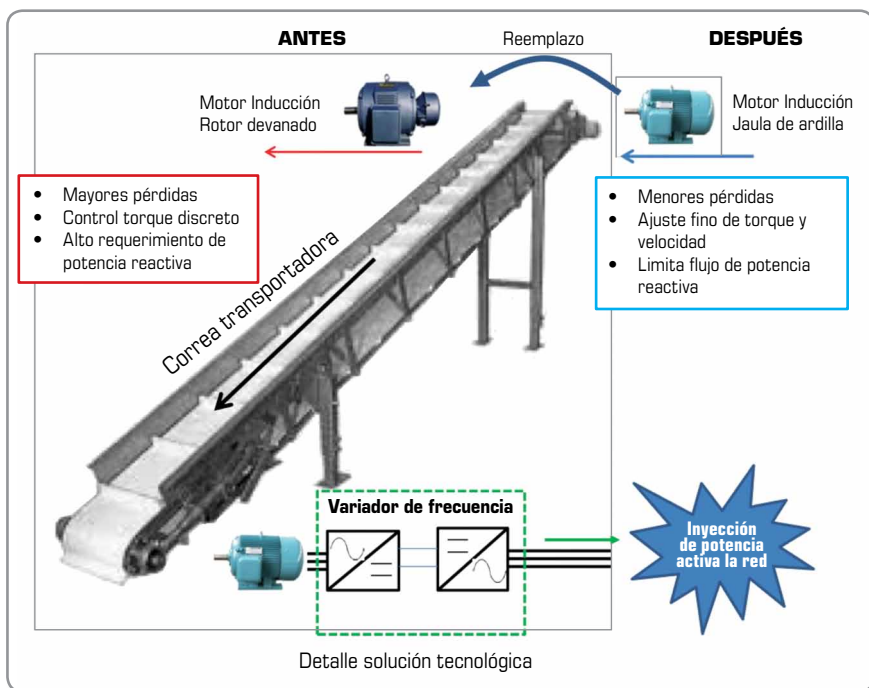


Figura 2: Esquema descriptivo de la innovación.

El proyecto innovador y con una serie de riesgos asociados tuvo éxito tras una exhaustiva sintonía fina del sistema y hoy día es un referente replicable en otros proyectos mineros similares, tanto a nivel nacional con Chuquicamata subterráneo, El Teniente Nuevo Nivel Mina, Andina 244 KTPD y Los Bronces como internacional con Antapaccay y Las Bambas, en Perú, entre otros.

La innovación tecnológica, considerando el conocimiento existente y la experiencia, además del apoyo local en el país, se veía atractiva, viable y con sentido para embarcarse en ella con el propósito de asegurar la rentabilidad del negocio. Se debe recordar que la viabilidad de ese proyecto minero debía ser neutra al precio de 60 centavos de dólar por libra de cobre en la fecha de evaluación. Dentro de los obstáculos que se debieron vencer están el informar y respaldar la toma de decisiones por parte del dueño y alinear la ingeniería y a nuevos ejecutivos para la adopción de esta innovación tecnológica.

Aspectos institucionales que han influido en el ejemplo

Esta innovación corresponde a un bien privado, aprovechado por la empresa minera y la empresa creadora de la solución tecnológica. El financiamiento del proyecto fue estrictamente privado, perteneciente al grupo minero chileno Antofagasta Minerals plc. (AMSA).

El desarrollo contó con financiamiento complementario principalmente de Fondef y Fondecyt, lo que permitió generar el conocimiento básico de los expertos de los centros de investigación que participaron en el proyecto. Este fenómeno ha sido común a grupos de investigación en electrónica de potencia, concentrados hoy en las universidades Técnica Federico Santa María, de Concepción, PUC, USACH y de Chile, donde se ha creado una masa crítica de investigadores involucrados en distintas innovaciones asociadas al mundo industrial.

El trabajo en equipo, la transparencia y comunicación sin sorpresas fue fundamental para el éxito del proyecto a base de la confianza delegada por el dueño hacia el grupo del proyecto, otorgando el empoderamiento efectivo ante la ingeniería de soporte y el fabricante.

Desde el ámbito académico hubo no solo receptividad hacia la idea original, sino que pasión y compromiso por llevarla a cabo, junto a un liderazgo para integrar los recursos humanos nacionales (UTFSM) y extranjeros disponibles (RWE, Bechtel, Conveyor Dynamics), incluyendo como pilar fundamental al fabricante (Siemens-Thyssen Krupp), el que pudo superar oportunamente las no conformidades. Los aspectos financieros y legales fueron respaldados por las entidades correspondientes.

Se puede destacar que el proyecto, a pesar de materializarse en Chile, fue realizado con una fuerte coordinación de culturas e ingeniería de diversos países, como Alemania, Estados Unidos, Canadá y Chile, para lograr la integración final de la innovación tecnológica. Esta tecnología

como parte del proyecto minero tuvo que conectarse eléctricamente con el Sistema Interconectado Central a través de una nueva línea de transmisión y cumplir con los términos y condiciones contractuales de suministro eléctrico. Cabe señalar que el sistema de correa regenerativa en bajada por túnel cuenta con 10 máquinas de inducción de 2,5 MW cada una, con un total de 25 MW de potencia instalada, y genera 22 MW de potencia media, lo que representa en la actualidad un 10 % del consumo de Minera Los Pelambres. Esta tecnología innovadora puede perfectamente ser catalogada como una energía no convencional, económica y limpia.

Finalmente, queda la sensación del logro de una hazaña a la altura del desafío y con liderazgo chileno.

Conclusiones y recomendaciones

El desarrollo de una capacidad de investigación establecida en una disciplina específica, como es el caso de la electrónica de potencia, se identifica como la base para crear un conocimiento local sólido para la innovación tecnológica. Esta capacidad de investigación se desarrolla en paralelo en varias universidades del país, en un esquema cooperativo y de apoyo mutuo.

Una segunda característica de este fenómeno es el interés de estas instituciones de investigación de aportar al desarrollo industrial y de vincularse efectivamente con la industria minera y con sus proveedores de tecnologías.

Consecuentemente, una de las lecciones que deja el proyecto descrito es la capacidad concreta de realizar innovaciones en aplicaciones tecnológicas que dan valor económico a la industria.

Para ello, la vinculación internacional de los académicos involucrados con laboratorios de excelencia en el extranjero permitió establecer líneas de investigación activas e intercambio de estudiantes. A lo anterior se suma el apoyo de fondos nacionales de investigación, que, si bien fueron limitados, permitieron el financiamiento de estudiantes y equipamiento básico de laboratorio.

En definitiva, se constata la creación de un clima de confianza empresa local, universidad y proveedor de tecnología, que redundó en tomas de decisiones que hacen realidad la innovación descrita.

Cabe mencionar que el valor económico de estas aplicaciones en general ha sido capturado por las empresas locales en términos de aumento de productividad y reducción de costos, y por los proveedores de tecnología en la forma de nuevos productos y propiedad intelectual. Por su lado, la captura de valor por parte de los centros de investigación locales es limitada.

Respecto de las recomendaciones para mejorar en forma significativa las funciones de las instituciones, las orientaciones de los instrumentos

y la formación de profesionales y técnicos en las universidades, se puede concluir lo siguiente:

- Es clave mantener la tendencia de apoyo con recursos económicos significativos a los centros de investigación existentes, como los que dieron lugar a la innovación referida, creando plataformas que les permitan avanzar de una etapa de desarrollo de aplicaciones tecnológicas a una de diseño y desarrollo de equipamiento y de nuevas tecnologías, capturando a nivel nacional el valor que hoy recogen proveedores extranjeros. Para ello se identifica la necesidad de crear capacidades de transitar desde un prototipo de laboratorio a un producto comercial, ya sea a través de mejoras en la organización de las empresas, o bien en las competencias de los profesionales involucrados.
- Identificar nichos temáticos promisorios en el área energética que permitan integrar grupos de trabajo de varias instituciones del país y apoyarlos para la formación de una masa crítica que pueda emprender nuevos desafíos en el ámbito de aplicaciones tecnológicas. Para ello se reconoce como aspecto clave mantener el contacto con la industria y con centros de investigación de primer nivel en el extranjero.
- El financiamiento de desarrollos piloto en el ámbito energético (por ejemplo, el desarrollo de un prototipo de generación mareomotriz o de filtros activos de potencia para la industria minera) se reconoce como un mecanismo eficiente para crear capacidad de innovación local de proyección mundial.

Literatura citada

- KHAMBADKONE, HOLTZ. (1991). Vector controlled induction motor drive with a self-commissioning scheme. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 38, 322-327.
- NOVOTNY, LIPO. (1996). Vector control and dynamics of AC drives. University of Wisconsin-Madison USA, Oxford University Press, 255-396.
- PONTT. (2010). High-Power Drives for Energy Efficiency and abatement of carbon emissions in Mineral Processing, (invited presentation), IEEE-ICIT'2010.
- PONTT. (2011). Mineral Processing: Not So Dirty with Modern Power Electronics, Invited presentation Plenary Session, IEEE-International Conference on Industrial Technology, ICIT'2011.
- PONTT, RODRÍGUEZ, HUERTA. (2003). Método y dispositivo para la atenuación de armónicas generadas en la red eléctrica por rectificadores regenerativos. Solicitud de patente chilena 1178-2003. (Patente en proceso).
- PONTT, RODRÍGUEZ, HUERTA, NEWMAN, MICHEL, LASTRA. (2005). High-Power Regenerative Converter for Ore Transportation Under Failure Conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41, 1411-1419.
- RODRÍGUEZ, PONTT, ALZAMORA, BECKER, EINENKEL, WEINSTEIN. (2002) Novel 20 MW Downhill Conveyor System using Three-Level Converters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*; 49, 1093-1100.

- RODRÍGUEZ, PONTT, ALZAMORA, BECKER, HUERTA, KOURO, CORTÉS, LEZANA. (2005). Resonances in a High Power Active Front End Rectifier System, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 52, 482-488.
- RODRÍGUEZ, PONTT, BECKER, WEINSTEIN. (2002). Regenerative Drives in the Megawatt Range for High-Performance Downhill Belt Conveyors, IEEE Transactions on Industry Applications, 38, 203-210.

ÁREA FORESTAL

Valor agregado de los modelos de crecimiento y producción en la industria forestal

Horacio E. Bown,
Facultad de Ciencias Forestales y de Conservación de la Naturaleza,
Universidad de Chile.

Jean-Pierre Lasserre,
Gerente de Tecnología Silvícola, Forestal Mininco S.A.

Roland Peters,
Director Modelo Nacional de Simulación, Universidad de Concepción.

Fernando Dunn,
Asesor Forestal. Ex Presidente Directorio Modelo Nacional Simulación.

Cristian Higuera,
Investigador Modelo Nacional de Simulación de Crecimiento,
Universidad de Concepción.

Julio Tobar,
Jefe Departamento de Desarrollo de Dasometría, Forestal Mininco S.A.

Resumen

Más de 2 millones de hectáreas (2,7 % de la superficie de Chile continental) de plantaciones forestales cultivadas (*i. e. Pinus radiata, Eucalyptus globulus y Eucalyptus nitens*) generan anualmente alrededor de 6 mil millones de dólares en divisas para el país (7,3 % del total de exportaciones). Esto representa la consolidación de una pujante industria forestal desarrollada fuertemente a partir de la década de 1970. El progreso del sector en estas cuatro décadas ha ido de la mano con la innovación en silvicultura y manejo de plantaciones, mejoramiento genético, producción

de plantas, sistemas de inventario, modelos de optimización en cosecha y transporte, modelos de simulación de crecimiento, prevención y control de plagas, enfermedades e incendios forestales y, más recientemente, con los aspectos ambientales y sociales de sustentabilidad de plantaciones forestales. El éxito que ha tenido el sector se debe, al menos parcialmente, a que la innovación ha sido entendida como una parte integral del negocio. Lamentablemente, una mayor innovación en el sector forestal se ha visto limitada por la escasez de instrumentos públicos de apoyo a la investigación de mediano y largo plazo.

El caso de estudio que se presenta en esta oportunidad constituye el esfuerzo de veinticinco años de un consorcio de empresas forestales, universidades e institutos de investigación. El Modelo Nacional de Simulación (MNS) (www.simulador.cl), hoy coordinado por la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción e impulsado por las principales empresas forestales del país (*i. e.* Forestal Mininco S.A., Forestal Arauco S.A. y Masisa S.A.), representa el estado del arte en esta disciplina, se encuentra fuertemente conectado con la realidad al contar con una red de parcelas experimentales de monitoreo en terreno que son medidas regularmente y es auditado técnicamente por los mejores expertos a nivel mundial.

Esta herramienta es utilizada rutinariamente para establecer la mejor forma de manejar plantaciones forestales (podas, raleos, espaciamiento), para maximizar el valor patrimonial, tasar activos forestales, actualizar inventarios, programar la cosecha y determinar la oferta de materias primas para la industria, entre otras. Además, es comúnmente aceptada como herramienta de intercambio de información por los distintos actores del sector. En este proyecto, que nace como una iniciativa privada, se han invertido alrededor de 12 millones de dólares, pero también se ha contado con aportes públicos por aproximadamente un millón de dólares en la forma de dos proyectos Fondef-Conicyt y un FDI-Corfo. Los beneficios del MNS se estima que superan holgadamente los costos. Testimonio de ello es el renovado interés de las empresas participantes por continuar desarrollando esta herramienta. Líneas emergentes de desarrollo del MNS pretenden incorporar variables ambientales, fisiológicas y de suelos a la predicción de productividad, biomasa, secuestro de carbono y uso de agua en plantaciones forestales, lo que permitiría simular, adicionalmente a sus usos tradicionales, escenarios de cambio climático global, nuevas técnicas de establecimiento, mejoramiento genético y nuevas intervenciones silviculturales, entre otras. Lo anterior requerirá continuidad en el MNS con una visión y compromiso de mediano plazo que desafortunadamente excede el alcance de los fondos y concursos públicos de investigación actualmente disponibles. A pesar de que en la actualidad el MNS es un bien privado con acceso público contra un pequeño pago, el directorio del proyecto plantea escalar el producto hasta transformarlo en un bien público. Si se entiende innovación como un instrumento de creación de riqueza basa-

do en nuevo conocimiento, entonces el Modelo Nacional de Simulación (MNS) ha permitido todo ello al proveer información oportuna para la toma de decisiones y valorizar las plantaciones forestales del país. Además el proyecto ha abierto las puertas para la futura internacionalización del modelo en Brasil, Ecuador, Argentina y Uruguay. Por todo lo anterior, el MNS representa un excelente ejemplo de un proyecto cooperativo de largo plazo, que ha permitido aunar esfuerzos públicos y privados y desarrollar capital humano especializado.

PARTE I: Aspectos generales, nacionales e internacionales acerca de la innovación forestal

Poco más de 2 millones de hectáreas (2,7 % de la superficie de Chile Continental) de plantaciones forestales cultivadas (*i. e. Pinus radiata, Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*) generan alrededor de 6 mil millones de dólares en divisas para el país anualmente (7,3 % del total de exportaciones). Esto representa la consolidación de una pujante industria forestal desarrollada fuertemente a partir de la década de 1970. El éxito de esta actividad se debe fundamentalmente a una legislación e institucionalidad acorde a la importancia de la actividad, estabilidad democrática y económica, empresas de clase mundial y capital humano altamente capacitado, que, además de desarrollar el patrimonio forestal, ha innovado en el uso de herramientas de alta sofisticación para asistir en la toma de decisiones en un negocio eminentemente de largo plazo. El progreso del sector en estas tres décadas ha ido de la mano con la innovación en silvicultura y manejo de plantaciones, mejoramiento genético, producción de plantas, sistemas de inventario, modelos de optimización en cosecha y transporte, modelos de simulación de crecimiento, protección ante plagas y enfermedades, control de incendios forestales y, más recientemente, con los aspectos ambientales y sociales de sustentabilidad de plantaciones forestales. El éxito que ha tenido el sector se debe, al menos parcialmente, a que la innovación ha sido entendida como una parte integral del negocio, lo que resulta particularmente meritorio debido al largo período que se requiere en este negocio para ver los frutos de la innovación.

Normalmente se considera la innovación como un instrumento de creación de riqueza basado en nuevo conocimiento. En el área forestal, como en otras áreas que trabajan con recursos naturales renovables y comunidades, esta definición no es suficiente y debe ser enmarcada en un concepto de nivel superior denominado sustentabilidad.

Trescientos años atrás, Hans Carl von Carlowitz (1645-1714), un administrador de minas alemán, constataba con disgusto que el abastecimiento de madera a las minas de plata que él supervisaba disminuía año a año y criticaba el afán de lucro de la explotación forestal excesiva. Publicó un libro, *Sylvicultura oeconomica*, en el cual acuñó el término

alemán que designa la sostenibilidad: *Nachhaltigkeit*. El principio de *Nachhaltigkeit* debía aplicarse a la ordenación de los bosques para asegurar el suministro perpetuo de madera, e instó a tomar medidas que hiciesen de los bosques una fuente permanente de recursos económicos. No es coincidencia que justamente el concepto de rendimiento sostenido, hoy por hoy, haya sido sustituido y ampliado en su significado con el término de sustentabilidad, originalmente acuñado en Europa central hace ya tres siglos por las ciencias forestales.

De acuerdo a la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), sustentabilidad significa asegurar los derechos y bienestar humano sin disminuir la capacidad de los ecosistemas de la tierra de mantener la vida. Es un concepto multidimensional que comprende simultáneamente integridad ambiental, bienestar social, resiliencia económica y buena gobernanza. En un ámbito más específico, The Society of American Foresters define manejo sustentable como un enfoque ecológico a la gestión de recursos naturales a nivel de paisaje, que combina procesos de orden social, físico, económico y biológico, para asegurar la sustentabilidad de ecosistemas saludables mientras que al mismo tiempo provean valor, bienes y servicios. Similarmente, FAO define manejo sustentable como la responsabilidad (*stewardship*) y uso de los ecosistemas de una manera y a una tasa que mantenga su biodiversidad, productividad, capacidad de regeneración, vitalidad y su potencial para satisfacer ahora, y en el futuro, funciones ecológicas, económicas y sociales relevantes a nivel local, nacional y global, y que no causa daño a otros ecosistemas. En este contexto, innovación en el área forestal puede interpretarse esencialmente como nuevas combinaciones de ideas familiares o un nuevo uso de una idea antigua motivada por necesidades o deseos, en un marco de sustentabilidad, para generar riqueza, bienestar social y ambiental (White, 1992).

La innovación en el área forestal ha visto su mayor desarrollo a partir de la década de 1970. Con la promulgación del Decreto Ley 701 de 1974 sobre regulación y fomento forestal se generó un crecimiento explosivo y sostenido en las tasas de forestación que durante algunos años incluso superaron las 100.000 ha. Esta actividad se realizó mayoritariamente en suelos de aptitud preferentemente forestal con bajo o nulo potencial productivo tradicional agrícola o ganadero y mayoritariamente en terrenos baldíos, sin bosque nativo o con matorral nativo fuertemente degradado. Inicialmente, *Pinus radiata*, una especie originaria de Monterrey en Estados Unidos, fue la especie predilecta; pero paulatinamente algunas especies originarias de Australia del género *Eucalyptus* (*E. globulus* primero y posteriormente *E. nitens*) ganaron rápidamente terreno. Esto se tradujo en que hoy día existan más de 2 millones de hectáreas de plantaciones, muchas de ellas intensivamente manejadas, cubriendo holgadamente las necesidades nacionales, disminuyendo indirectamente las presiones de uso sobre los bosques nativos

y entregando grandes ingresos de exportación en pulpa y papel, madera aserrada, y tableros y paneles, entre otros.

En este contexto, a partir de fines de la década de 1970 se empezó a desarrollar fuertemente la innovación en el ámbito de la silvicultura. De acuerdo con la Society of American Foresters, la silvicultura se define como el arte y la ciencia de controlar el establecimiento, crecimiento, composición de especies, sanidad y calidad de los bosques y áreas silvestres para cubrir las diversas necesidades y valores de los propietarios de la tierra y de la sociedad en forma sustentable. Algunas de las preguntas silvícolas críticas en dicha década se referían a cómo producir plantas, dónde conseguir semillas, cómo controlar plagas y enfermedades en los viveros, qué características debían tener las plantas antes de llevarlas al terreno, cuándo plantarlas, cómo preparar el suelo antes de plantarlas, cómo controlar las malezas, y cuántas veces, cómo transportar las plantas, qué herramientas usar en la plantación, cuál era la necesidad de fertilizar, con qué elementos y en qué dosis, entre muchas otras. Posteriormente a principios de la década de 1980, surgieron preguntas como cuál debiese ser la densidad óptima inicial de plantación, cuál es la necesidad de ralear (*i. e.* reducir el número de árboles por hectárea y concentrar el potencial productivo del sitio en los árboles remanentes para que puedan crecer mejor), cuál es la necesidad de podar (*i. e.* eliminar ramas en la sección inferior del tronco de los árboles para producir madera libre de nudos de mayor valor), cuántas podas y raleos se deben realizar, con qué intensidad, cuándo y en qué medida la inversión realizada se pagará, entre otras. La innovación entonces para responder a estas y muchas otras preguntas fue crucial para el desarrollo del sector. Para responder a estas preguntas se pretendió adaptar fundamentalmente la tecnología neozelandesa a la realidad nacional, referida a establecimiento de plantaciones y a la mejor combinación de podas y raleos, lo que requirió una gran capacidad de los profesionales y técnicos locales del ámbito académico y privado para hacerla funcionar a gran escala en el país. Esto no fue tan fácil como parecería desde la perspectiva actual, agravado por el largo plazo de respuesta del bosque a cualquier intervención, por lo que se requirió prueba y error, con sus consecuencias, y el desarrollo de tecnologías específicas para nuestra realidad. Al combinar nuevas tecnologías foráneas con nuevos elementos locales requeridos para hacerlas funcionar se puede argumentar que se innovó generando conocimiento y agregando valor a la industria forestal y a la sociedad.

El aporte de ideas desde Nueva Zelanda, combinada con la expertise nacional, generó innovación en la silvicultura de *P. radiata*. Las primeras plantaciones de *P. radiata* en Nueva Zelanda se realizaron en la década de 1920, pero solo a partir de la década de 1930 los productores forestales se dieron cuenta de que se trataba de una madera de buena calidad y con un tremendo potencial de crecimiento. Por ello, a partir de la década de

1940 se comienzan a diseñar regímenes silviculturales (i. e. secuencia de intervenciones silvícolas que ocurren a lo largo de la vida de un rodal) que se distanciaban notablemente de la silvicultura tradicional europea. Ya por la década de 1960 los objetivos del manejo comenzaron a esclararse debido a que el tema de la rentabilidad del cultivo asumió gran importancia en Nueva Zelanda. En 1968, Fenton y Sutton propusieron un régimen alternativo que era potencialmente más rentable que los seguidos hasta ese momento en Nueva Zelanda. Planteaban que las trozas más valiosas son las dos primeras de cada árbol y que la silvicultura debiera tener como objetivo mejorar su calidad; y de allí, la necesidad de realizar podas y raleos en forma temprana. En Chile, en los años 80 surgieron las mismas dudas que ocurrieran en Nueva Zelanda, y como resultado de ello, diversos grupos de investigadores neozelandeses visitaron nuestro país en giras tecnológicas que permitieron a los profesionales chilenos impulsar la silvicultura de *P. radiata* agregando nuevo conocimiento y valor a la industria forestal en Chile. Las mejoras en el cultivo de *P. radiata* motivaron a los profesionales chilenos a desarrollar una silvicultura local específica para *E. globulus* y *E. nitens* relativamente independiente de lo que ocurría en el resto del mundo, ajustada particularmente a la realidad local, agregando conocimiento y valor a la industria forestal.

Ya a principios de la década de 1980 se preveía la explosiva oferta de materias primas que se generaría en los siguientes años, por lo cual se requirió innovar en aspectos de cosecha, transporte y procesamiento industrial de materias primas. La industria de pulpa y papel ya se encontraba en curso desde la década de 1960 en función de la visión estratégica de futuro y de las inversiones del Estado de Chile a través de la Corporación de Fomento con la creación de las plantas de pulpa y papel en Constitución (Región del Maule) y Arauco (Región del Biobío). Sin embargo la industria del aserrío y elaboración presentaba desarrollo incipiente en la década de 1970, lo que requirió innovación para mejorar la precisión de corte, estabilidad dimensional mediante técnicas de secado artificial y preservación, entre otras. Similarmente, la industria de paneles y tableros era de desarrollo incipiente en la década de 1970, por lo cual también se requirió innovar en cuanto a adhesivos, control industrial, control de calidad, presentación de productos y mercadotecnia. Por otro lado, los aspectos de cosecha y transporte debieron dar un salto cualitativo y cuantitativo de importancia para poder manejar los altos volúmenes de cosecha que se comenzaron a generar a partir de la década de 1980. A modo de ejemplo, la cosecha a finales de la década de 1960 y principios de la década de 1970 se realizaba con buyes; y en los sectores más planos, con tractores agrícolas. Sin embargo, a partir de la década de 1980 se comenzó a incluir maquinaria especializada como los *skidders* y las torres de maderreo, y se tuvo que innovar en su uso a nivel local. La construcción de caminos forestales y el transporte de trozos desde el bosque a la industria también tuvieron que escalar a nuevos estándares

para adaptarse a los grandes volúmenes de madera por transportar. En todas estas actividades silvícolas, de cosecha, de construcción de caminos, de transporte, de procesamiento industrial y de mercadotecnia hubo grandes innovaciones que nacieron de combinar ideas nuevas o antiguas para agregar valor en la industria forestal.

De todas las innovaciones en el área forestal chilena, probablemente las más duraderas y de mayor impacto son las referidas a genética y a tecnologías de la información. Estas últimas herramientas han revolucionado la forma como se toman las decisiones y la manera de conducir el negocio en Chile y en el mundo. Entre ellas se encuentran los sistemas de inventario/información silvícola, los sistemas de información geográficos (SIG), los sistemas de optimización y los modelos de crecimiento y producción, donde destaca el caso del estudio que se presenta.

El nuevo paradigma de sustentabilidad con integración de información a distintos niveles de carácter social, ambiental y económico hace prever que estas herramientas serán aún más importantes en el futuro. Los sistemas de inventario/información silvícola son sistemas transversales que cruzan la organización y que permiten acceder a información muy específica de un rodal (área contigua homogénea de bosque) o del resultado de una intervención silvícola particular, como también a obtener información agregada de todos o una parte de los rodales que constituyen el patrimonio. Estos sistemas basados en complejos sistemas de muestreo requieren de la alimentación permanente de la información colectada por cuadrillas de terreno que miden los árboles de áreas reducidas representativas, lo que permite extrapolar a nivel de los rodales completos. Normalmente las grandes empresas forestales de nuestro país, notablemente Forestal Mininco, Arauco y Masisa, portan sus sistemas de inventario a otras filiales geográficas dentro de Chile o del extranjero (e. g. Brasil, Argentina, Uruguay, etc.). Los sistemas de información geográfica (SIG) han revolucionado la cartografía y la representación de la información espacial en los ámbitos privados y públicos del área forestal del país. Si bien la aplicación ESRI ArcGis desarrollada y mantenida en Estados Unidos representa el estado del arte en sistemas de información geográfico, se han desarrollado innovaciones locales que han permitido georreferenciar prácticamente toda la información de bosques, agilizando y permitiendo una mejor toma de decisiones. Los sistemas de inventario/información silvícola y los sistemas de información geográfica se encuentran actualmente fuertemente interrelacionados en las empresas forestales del país.

Por otra parte, los sistemas y modelos de optimización han jugado un rol fundamental en la asignación de recursos escasos en todos los niveles de decisión. Por ejemplo en los niveles operativos (día a día) de decisión operan sistemas tales como ASICAM, que permite la programación y despacho de camiones de transporte de madera al interior de una empresa forestal, u OPTICORT, el cual es un sistema de optimización

de trozado de los árboles que posibilita maximizar el valor del bosque en la etapa de cosecha. En el nivel táctico existen otros modelos de optimización, tales como PLANEX, que es un sistema que permite localizar caminos y equipos de cosecha en forma gráfica. Estos tres sistemas han sido desarrollados por académicos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (Dr. Andrés Weintraub y Dr. Rafael Epstein) y son utilizados rutinariamente en programación de actividades por las principales empresas forestales del país.

En el nivel estratégico se han desarrollado modelos de optimización que permiten planificar los niveles de cosecha en grandes patrimonios en el mediano y largo plazo para maximizar el valor del bosque y lograr flujos de cosecha que cumplan con las restricciones impuestas por sus propietarios. Destaca un modelo actualmente utilizado por Forestal Mininco S.A. denominado AUSTRAL, desarrollado por el académico de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Austral Dr. Gonzalo Paredes (Q.E.P.D.).

Por último, los modelos de crecimiento integran el crecimiento de plantaciones forestales para distintas zonas de crecimiento y regímenes de manejo de manera coherente, mediante un conjunto de reglas y ecuaciones matemáticas que interactúan entre sí. Estas herramientas se utilizan rutinariamente para prescribir la mejor forma de manejar plantaciones forestales (podas, raleos, espaciamento entre árboles), de acuerdo a los objetivos deseados, para maximizar el valor patrimonial, tasar activos forestales, actualizar inventarios, programar la cosecha y determinar la oferta de materias primas para la industria, entre otras. Además, su uso es comúnmente aceptado como herramienta de intercambio de información por los distintos actores del sector.

El caso de estudio que se presenta constituye el esfuerzo de veinticinco años de un consorcio de empresas forestales, universidades e institutos de investigación cuyos profesionales tuvieron la visión de crear una herramienta computacional que permitiera predecir los crecimientos y rendimientos, a diferentes edades, de plantaciones forestales de distintas especies, zonas productivas y regímenes de manejo. El Modelo Nacional de Simulación (MNS) (www.simulador.cl), hoy coordinado por la Universidad de Concepción e impulsado por las principales empresas forestales del país (*i. e.* Forestal Mininco S.A., Forestal Arauco S.A. y Masisa S.A.), representa el estado del arte en esta disciplina y está sujeto a un proceso de mejoramiento continuo. En 1987 se analizó la factibilidad de adaptar directamente los modelos de crecimiento para *P. radiata* desarrollados para Nueva Zelanda (STANDPACK), pero posteriormente esta idea se abandonó por favorecer el desarrollo de esta innovación en forma local. Esta fue probablemente la decisión más importante que dio origen a la innovación.

En resumen, la innovación en el área forestal debe ser entendida como un instrumento de creación de riqueza, bienestar social y ambiental basa-

do en nuevo conocimiento desarrollado en un marco de sustentabilidad. Los ámbitos de la innovación han cambiado en el tiempo. En la década de los 1970 el foco se puso en el establecimiento y productividad de las plantaciones mientras que en la década de 1980 en la silvicultura de las mismas. En la década de 1990 la innovación se centró en las tecnologías de información, donde destacan los sistemas de inventario, los sistemas de información geográficos, los sistemas/modelos de optimización y los modelos de crecimiento; éste último objeto de nuestro caso de estudio. A partir de la década de 1990 se ha acentuado la necesidad de innovar en los ejes sociales y ambientales de la industria forestal donde se han hecho avances importantes. Sin embargo, existen grandes desafíos en la inclusión de comunidades rurales, manejo del agua, rehabilitación de zonas degradadas e introducción de nuevas especies, entre otras. Los sistemas de certificación forestal, notablemente CERTFOR y FSC, han cambiado la forma de trabajar en las empresas forestales del país, mejorando el desempeño ambiental y social de ellas con un compromiso de mejoramiento continuo en todas sus áreas de desarrollo. Más allá de las plantaciones, pero aún relacionado con ellas, el manejo y conservación de los bosques nativos es probablemente el área más abandonada y donde se requieren los mayores esfuerzos en innovación.

En términos de posicionamiento internacional, la innovación de alto nivel en Chile se encuentra bastante atrasada. Nuestra innovación se ha concentrado fundamentalmente en mejorar las operaciones y resultados en el corto plazo. El Estado, en este sentido, tampoco ha señalado al sector forestal como prioritario en investigación e innovación de mediano y largo plazo. La actual Estrategia Nacional de Innovación identificó solo cinco sectores económicos como los que hoy ofrecen mayor potencial de desarrollo en el largo plazo: acuicultura, agroalimentos, minería, servicios globales y turismo de intereses especiales, dejando inexplicablemente fuera al área forestal, donde se observan carencias en las áreas de biotecnología, sustentabilidad y contaminación, entre otras.

La naturaleza de largo plazo de este negocio conlleva a que muchos instrumentos de financiamiento de la investigación e innovación no sean aplicables. Esto es porque normalmente la innovación se financia por 3 a 4 años, lo que, comparado con una rotación (*i. e.* tiempo que transcurre entre la plantación y la cosecha) de 20 años, es muy corto. Debido a las rotaciones largas, la rentabilidad de la actividad es relativamente baja (*e. g.* comparado con la minería), lo que limita que se realice investigación y desarrollo en el sector. La concentración de la actividad en unos pocos actores hace también que el Estado privilegie otras actividades donde exista mayor fragmentación de la propiedad.

Finalmente, la innovación forestal en el país ha permitido generar riqueza, bienestar social y ambiental, pero los desafíos en los ámbitos sociales y ambientales son inmensos y debieran ser privilegiados.

PARTE II: Análisis de un ejemplo específico modelo nacional de simulación de crecimiento forestal

Un modelo de crecimiento se puede definir como una abstracción de la dinámica natural de un rodal forestal, e incluye el crecimiento, la mortalidad, la regeneración natural y otros cambios en la composición de especies y estructura del rodal. El uso común del término “modelo de crecimiento” se refiere a un sistema de ecuaciones mediante el cual se puede predecir el crecimiento y rendimiento de un rodal bajo una amplia gama de condiciones. Así, un modelo de crecimiento involucra una serie de ecuaciones matemáticas, los valores numéricos imbuídos en esas ecuaciones, la lógica necesaria para conectar estas ecuaciones y el código requerido para implementar el modelo en un computador (Vanclay, 1994). Los modelos de crecimiento pueden clasificarse, de acuerdo a su filosofía, en tradicionales o empíricos, fisiológicos o de procesos e híbridos.

Los modelos tradicionales de crecimiento forestal describen patrones históricos de crecimiento para predecir el desarrollo futuro de rodales (Proe *et al.*, 1994). Estos modelos son apropiados cuando las condiciones ambientales y las técnicas de cultivo permanecen similares a las del pasado. Sin embargo, la intensidad de la silvicultura aplicada, el uso de material genéticamente mejorado y los procesos de cambio global hacen que las condiciones presentes sean diferentes a las del pasado y probablemente serán diferentes a las que encontraremos en el futuro (Kimmins *et al.*, 1990; Johnsen *et al.*, 2001).

Los modelos fisiológicos, por el contrario, están basados en una comprensión (más) mecanística de los procesos fisiológicos y pueden predecir productividad sobre un rango más amplio de condiciones ambientales (Landsberg and Gower, 1997; Johnsen *et al.*, 2001; Landsberg, 2003) tales como el aumento de temperatura y concentración de CO₂ en la atmósfera. Estos modelos juegan un rol fundamental en la evaluación del cambio ambiental global, el balance de carbono, y la eficiencia en el uso de agua y nutrientes (Jarvis, 1995). Sin embargo, la aplicación de modelos fisiológicos en la toma de decisiones forestales se encuentra restringida debido a la falta de datos precisos, una calibración compleja, y una comprensión incompleta de los procesos fisiológicos más relevantes (Mäkelä *et al.*, 2000; Johnsen *et al.*, 2001).

Los modelos híbridos combinan la capacidad predictiva y robustez de los modelos tradicionales de crecimiento con la flexibilidad de los modelos fisiológicos, proveyendo un mayor realismo biológico y requiriendo menos parámetros que los modelos fisiológicos (Kimmins *et al.*, 1990, Mäkelä *et al.*, 2000; Landsberg, 2003). El enfoque híbrido, comparado con el enfoque tradicional y fisiológico, puede asistir de mejor forma las necesidades particulares de un rango más amplio de tomadores de decisiones, desde administradores forestales, investigadores, planificadores territoriales y agentes gubernamentales, entre otros. Sin embargo,

el avance en el desarrollo de estos modelos se ha visto limitado por la falta de una mejor comprensión de los procesos fundamentales de asimilación y distribución de carbono en el ecosistema, disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo e ingreso y redistribución interna de nutrientes en los árboles, entre otros (Raison y Myers, 1992; Waring *et al.*, 1998; Johnsen *et al.*, 2001; Landsberg, 2003). Adicionalmente, desde una perspectiva ambiental y de gestión, el impacto de utilizar material genéticamente mejorado y técnicas de manejo de la vegetación debiera ser incorporado dentro de estos modelos (Boomsma y Hunter, 1990; Raison y Myers, 1999; Landsberg, 2003).

El proyecto Modelo Nacional de Simulación se encuentra en una etapa de mejoramiento continuo en modelos tradicionales de crecimiento, que son muy robustos y estables, expandiéndose progresivamente también hacia modelos híbridos de crecimiento forestal con otras potenciales aplicaciones, como predicciones de crecimiento bajo distintos escenarios de cambio climático, estimación de biomasa y secuestro de carbono, cuantificación del uso de agua y continuidad en la modelación espacial de distintas zonas de crecimiento. Actualmente, el proyecto ya dispone de una primera versión de un Modelo Híbrido Multiespecie (MHM) basado en la acumulación de recursos ambientales (agua, temperatura, radiación, suelos) cuyos resultados son muy alentadores.

Historia del modelo nacional de simulación de crecimiento forestal

A fines de la década de 1980, en Chile, las plantaciones forestales, específicamente de *Pinus radiata*, se habían convertido en un recurso de alto interés económico y existían grandes empresas dedicadas a la plantación, manejo y utilización de este recurso. Previo a 1980 hubo varios intentos, tanto en universidades como en institutos de investigación, y en particular en las empresas que surgieron para cubrir la necesidad, por contar con un modelo de crecimiento y rendimiento para *P. radiata*. Lamentablemente, muchos de estos valiosos esfuerzos no llegaron a buen término porque carecieron de datos robustos y suficientes para modelar el crecimiento de las plantaciones. Solo a partir de 1980, a través de un proyecto Conaf/PNUD/FAO, se materializó un primer simulador denominado **RADIATA**, en cuyo desarrollo participaron coordinadamente equipos investigadores de la Universidad Austral, Universidad de Chile y del Instituto Forestal, aprovechando la información de parcelas permanentes que había recolectado esta última institución. Este modelo correspondió a un modelo agregado de rodal que no entregaba información específica de un árbol o clase diamétrica en particular, sino del rodal en su conjunto con variables expresadas a nivel de una hectárea *e. g.* número de árboles por hectárea, altura de los árboles, área basal y volumen, entre otras. Sin embargo, y testimonio de su robustez, fue ampliamente utili-

zado en la década de 1980. Sin embargo, la importante evolución que tuvieron las técnicas de manejo, producción de plantas, establecimiento y diversificación de productos dejaron rápidamente obsoleto este modelo que representaba solamente un manejo tradicional sin podas, con raleos tardíos y un material genético no mejorado.

El oscuro diagnóstico preparado por Fundación Chile en 1987 respecto de los modelos de crecimiento que estaban siendo utilizados hasta esa fecha condujo años más tarde a un acuerdo de las principales empresas forestales del país para desarrollar y financiar un Proyecto Nacional para construir un Modelo de Simulación de crecimiento para *P. radiata* al alero institucional de Fundación Chile, al cual contribuirían todas ellas con sus bases de datos históricas y nuevas según un diseño coordinado de una red de ensayos. El proyecto nace debido a la recomendación de este grupo de empresas e instituciones de innovar por sobre la alternativa de adquirir sistemas y conocimientos empaquetados desde el extranjero. Esta iniciativa se concretó en octubre de 1989, creándose un equipo de especialistas en modelación que durante los primeros 12 años del proyecto entregó varias versiones del simulador **RADIATA PLUS**, correspondiente a un modelo agregado con predicción de la tabla de rodal, implementado además con módulos o algoritmos de establecimiento inicial, de podas y raleos, de trozado, de utilización y de evaluación económica, que culminaron en 2002 con la versión 5.4 que fue ampliamente utilizada en el país. Al inicio de este periodo resultó crítico el desarrollo de un esqueleto o maqueta coherente y con visión de largo plazo del sistema, de tal forma que se pudieran ir modificando y agregando nuevas funciones fácilmente. El diseño de la red de ensayos y su medición permanente en esta etapa también fue crítico para que el modelo fuera robusto y efectivamente representara cómo crecen los árboles en el terreno. La actividad de instalar y medir ensayos en forma continua tenía por objeto cubrir las necesidades de información de las empresas y aumentar el rango geográfico de uso del simulador.

En 1997 se obtiene por primera vez el apoyo del sector público a través del "Proyecto modelo de establecimiento inicial y de utilización de pino radiata" para desarrollar los modelos complementarios de 0 a 4 años y de aprovechamiento industrial a la edad de cosecha. A partir de la segunda mitad del año 2002, el proyecto inició el desarrollo de un modelo de árbol individual al cual concurre también con financiamiento el proyecto Fondef D01I1021, en el que también participaron la Pontificia Universidad Católica y la Universidad de Chile en áreas específicas de arquitectura de copas y de la calidad de madera, respectivamente. El nuevo modelo desarrollado, llamado **INSIGNE**, permitió aumentar la resolución en el manejo temprano de la plantación, especialmente podas, y en la etapa de cosecha, ventaja que emergió del seguimiento individual de los árboles y de sus parámetros físicos y de calidad.

INSIGNE simula el desarrollo de una plantación desde los 0 a los 30 años y permite modelar dicho crecimiento a nivel de rodal, de árbol

individual o en forma mixta. Tiene variadas formas de ingreso de datos y cumple también una significativa función como procesador y actualizador de inventarios. Permite simular podas y raleos, variables de copa en sus funciones predictoras de crecimiento y factores de calidad de madera en la etapa de cosecha.

Desde 1998, paralelamente al desarrollo del modelo de pino radiata, se sumó a los objetivos del proyecto la construcción de un simulador de rodal para dos especies de *Eucalyptus*, *E. globulus* y *E. nitens*, denominado **EUCASIM**. Este modelo simula el desarrollo de una plantación desde 0 a 20 años de edad, en el caso de *E. globulus* sin manejo, pero en *E. nitens* incluye el efecto de podas y raleos.

Terminado el acuerdo con Fundación Chile en el año 2006, el proyecto se trasladó a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción. Desde esa fecha se han liberado varias versiones tanto de INSIGNE como de EUCASIM. Ambos simuladores, inicialmente programados como sistemas monousuarios, se integraron en un solo Sistema Multiusuario a partir de 2009.

Simultáneamente con el mejoramiento continuo del Simulador Multiusuario a partir de 2011, el proyecto acogido a la Ley N° 20.241 de Incentivo Tributario a la Inversión Privada en Investigación y Desarrollo impulsó el desarrollo de un Simulador Híbrido Multiespecie (SHM), actualmente en su versión beta, que será entregado en el curso del presente año 2013 y que pretende posibilitar la integración de otras especies de interés, variables climáticas y de suelos a las simulaciones.

Productos complementarios de este proyecto no menos importantes son el **Sistema de administración del banco de datos e información**, hoy también en versión multiusuario que acumula más de 6 millones de registros, el **Sistema de consultas** para seleccionar y extraer del banco la información cruda o agregada que requiera un usuario, el **Sistema validador**, que permite evaluar las nuevas versiones, el **Catastro de ensayos**, que se actualiza periódicamente, y los más de 80 **Documentos de trabajo** publicados. En el marco del proyecto Fondef se publicaron en 2005 dos manuales de uso público ampliamente distribuidos en el país, las “Tablas auxiliares de producción”, que actualmente se están reeditando, y el “Manual práctico de manejo”.

Como una contribución a la enseñanza de las ciencias forestales, el proyecto ha distribuido a todas las universidades e institutos que imparten carreras forestales varias versiones actualizadas periódicamente de un **Simulador estudiantil**.

Finalmente, es importante señalar que el proyecto ha contratado durante su existencia múltiples asesorías en temas específicos y también auditorías técnicas de consultores tanto extranjeros como nacionales. Entre ellos destacan James Flewelling, Harold Burkhart, Alan Somerville, Euan Mason, Robert Shula, Oscar García, Donald Mead, Valerie Lemay, André Laroze, Guillermo Trincado y Horacio Bown, entre otros.

La administración del proyecto se hace a través de un Directorio que sesiona cada dos meses y que está constituido por representantes de las tres empresas socias y fundadoras, más el decano de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción. También existe un Comité Técnico, el cual se reúne mensualmente, donde participan profesionales de las empresas más el equipo de proyecto, conformado este último por su director, Dr. Roland Peters, subdirector, Dr. Pedro Real, los ingenieros forestales especialistas en biometría, Sr. Cristián Higuera y Sr. Luis Letelier, la encargada de ensayos y datos, Sra. Silvia Niebuhr, y el ingeniero en ejecución informático Sr. Christian Loayza.

El impacto de este proyecto es nacional, en toda el área cubierta por plantaciones de pino radiata y eucaliptos, desde la Región del Maule a la Región de Los Lagos. Hoy se dispone de una herramienta de última generación y alta resolución, que incorpora elementos empíricos, pseudoestocásticos e híbridos en los procesos de simulación en la predicción del crecimiento y de la calidad de madera. Además, se cuenta con una base de datos nacional que aúna los esfuerzos de las más importantes compañías forestales del país y que está disponible para la investigación en el área forestal. Esta base corresponde a una red nacional de casi 130 ensayos experimentales distribuidos en todas las zonas de crecimiento de *P. radiata*, *E. globulus* y *E. nitens*, cuya información se mantiene en un **Banco de datos e información** que normaliza el manejo de los grandes volúmenes de datos y garantiza su eficiente administración, calidad y especialmente su seguridad y permanencia en el tiempo.

Marco institucional aplicable al caso de estudio

Cabe consignar que este proyecto ha sido financiado mayoritariamente por el sector privado, representado actualmente por las empresas socias Forestal Mininco S.A., Forestal Arauco S.A. y Masisa S.A. La inversión total en los 25 años del proyecto se eleva por sobre los 12 millones de dólares, incluyendo el costo de instalación y medición de ensayos. A través de su larga vida, sin embargo, en las distintas etapas del proyecto le cupo participación a otras empresas hoy desaparecidas, adquiridas o fusionadas con las actuales socias, y también a instituciones públicas como el Instituto Forestal, CONICYT y Corfo, constituyéndose esta iniciativa de investigación e innovación en un claro y exitoso ejemplo de cooperación entre los sectores privado y público.

Durante la historia del proyecto se han obtenido fondos públicos por alrededor de un millón de dólares en Proyectos Fondef, Innova y FIT. Las empresas forestales han financiado, además de la operación del equipo técnico del proyecto, la instalación y medición de ensayos con costos que superan los ocho millones de dólares. Recientemente, la Corfo con la Ley N° 20.241 de Incentivo Tributario a la Inversión Privada en Investigación y Desarrollo, ha permitido contribuir a la continuidad del proyecto.

Durante mucho tiempo se trabajó con la idea de que este tipo de proyecto tuviera un desarrollo de largo plazo, dada su importancia para el país, y que sus instituciones apoyaran al menos parcialmente iniciativas de este tipo. Desafortunadamente los fondos disponibles para proyectos de desarrollo son de plazos que no se acomodan a las necesidades de proyectos del área forestal por tener un horizonte de desarrollo de alrededor de 13 a 25 años, dependiendo de la especie que se quiere analizar.

El proyecto siempre ha estado ligado al ámbito académico a través de la participación de universidades como sedes del proyecto, de académicos como directores o técnicos permanentes dentro del equipo de desarrollo y de la cooperación de científicos de universidades nacionales y extranjeras que han desarrollado modelos o partes del software. Por medio de diferentes convenios, el proyecto ha facilitado recursos para la generación de tesis de pre y posgrado en la mayoría de las universidades que imparten la carrera de Ingeniería Forestal en Chile, en donde ya se cuenta con más de treinta publicaciones de este tipo. Es importante señalar que la mayor parte de las publicaciones del proyecto son de carácter interno y restringido, lo que ha variado en estos últimos años, abriéndose la posibilidad de publicación en revistas indexadas de corriente nacional e internacional por parte de los académicos que utilizan información o recursos del proyecto.

La educación forestal en Chile se encuentra en crisis. El número de matrículas en Ingeniería Forestal no superó los setenta postulantes considerando todas las escuelas el año 2013. El cierre momentáneo de la carrera de Ingeniería Forestal en la Universidad Austral de Chile, una de las más prestigiosas, tradicionales y antiguas del país, ha sido un golpe fuerte para el sector forestal. Las razones para ello parecen ser variadas, entre las cuales se cuentan un egreso desmedido de profesionales, durante más de una década, con escasas posibilidades de desarrollarse profesionalmente y una tendencia mundial de pérdida de interés de los jóvenes postulantes por la carrera. La educación forestal en Chile es de alto nivel, y testimonio de ello es la contribución que ha hecho a la existencia de una industria forestal de clase mundial. La pérdida de ella representaría una desventaja para el país por la imposibilidad de llevar a cabo innovaciones exitosas como la que se presentó en el caso de estudio.

Conclusiones y recomendaciones

Sorprendentemente la génesis del proyecto Modelo Nacional de Simulación de Crecimiento (MNSC) corresponde a un ofrecimiento realizado por un consorcio neozelandés, formado por el Forest Research Institute, a fines de la década de 1980, de adaptar su modelo a nuestra realidad. Si bien se optó por no tomar esta opción, la exposición a esta nueva tecno-

logía permitió mostrar a los productores chilenos la importancia de una herramienta de este tipo, el alto costo de adquirirlo y, al mismo tiempo, motivar a las empresas, Estado, expertos y universidades a desarrollar una herramienta local. Así se impulsó un trabajo asociativo de largo plazo con una clara sinergia entre empresas e instituciones forestales. Algunas de las grandes ventajas de haber tomado este camino, y no otro, fue el poder unificar protocolos comunes: racionalizar la distribución, medición e instalación de ensayos, evitando duplicación de esfuerzos y logrando una mayor y mejor representatividad de sitios forestales; generar una nomenclatura común entre los distintos actores del sector; producir la correspondiente sinergia al compartir datos y ensayos, y lograr todo esto a un costo razonable.

La creación de una organización independiente con participación de todos los actores mostró ser un aspecto vital en el éxito del proyecto. La administración a través de un directorio y un comité técnico ha permitido orientar el trabajo y llevar un seguimiento constante de los avances, además de asignar prioridades y controlar el cumplimiento de tareas y presupuestos. Como consecuencia de la escala del proyecto, de la continuidad de la organización y de los recursos asignados, se ha podido auditar y validar técnicamente, con asesores de clase mundial, en forma periódica la robustez del modelo. Los resultados de dichas validaciones han demostrado que el modelo desarrollado es comparable con los mejores y más avanzados simuladores de Australia, Estados Unidos y Nueva Zelanda.

Por otra parte, este proyecto también ha dado cabida al uso y desarrollo de capacidades locales. Varios equipos técnicos han sido formados y se han capacitado en aspectos relacionados con el modelo. Un número no menor de esos profesionales se encuentran actualmente trabajando en empresas e instituciones que no forman parte de los actuales socios, lo que ha permitido permear el conocimiento adquirido a otros miembros de la comunidad.

Una visión de largo plazo y procesos de mejora continua han sido factores críticos para el éxito del proyecto. El negocio forestal es por naturaleza de largo plazo, por lo tanto se requiere de mucho tiempo para generar la información requerida para ajustar un modelo de este tipo. Las instituciones miembros han tenido la visión de mantener su desarrollo por un largo período. Este tipo de herramienta nunca debiera detener su desarrollo debido a la continua necesidad de dar respuesta a nuevos requerimientos de información diferentes a los originalmente establecidos. Actualmente existen grandes desafíos para estimar captura de carbono, acumulación de biomasa y consumo de agua, entre otras. Paralelamente, los continuos cambios en las tecnologías de información y en los objetivos de producción, en la silvicultura de establecimiento y manejo, en el mejoramiento genético y más recientemente en el clima, también obligan a una permanente actualización.

De modo adicional a los beneficios originalmente previstos, el contar con una herramienta confiable de valoración del patrimonio forestal ha sido de enorme utilidad para el sector forestal chileno. Ejemplo de ello son los importantes intercambios de patrimonio entre empresas que han utilizado esta herramienta como un estándar para asignar valor a sus plantaciones. Otro ejemplo lo constituyen las empresas auditoras, que dan importancia a contar con valores validados por instituciones independientes (i. e. en este caso el modelo es administrado por la Universidad de Concepción). Además, para efectos de los seguros contra incendios y daños de plantaciones, es importante contar con información independiente. Otros usos emergentes han nacido al fortalecer los lazos con la comunidad. La responsabilidad social empresarial ha surgido como un nuevo paradigma en la administración de los negocios. Así, compartir los simuladores, los datos provenientes del modelo, la formación de capital humano avanzado, las labores de extensión en los colegios y organizaciones sociales, el apoyo técnico a los vecinos, muchos de ellos pequeños propietarios, han impulsado al proyecto a organizarse apropiadamente para llevar a cabo esta labor.

El proyecto Modelo Nacional de Simulación también se ha transformado en un medio para mejorar y potenciar la relación entre las empresas, universidades e institutos de investigación. En este sentido, se han abierto nuevas vías de comunicación para desarrollar memorias y tesis de postgrado, particularmente con la Universidad Austral de Chile, Universidad de Talca, Universidad de La Frontera, Universidad de Concepción y Universidad de Chile, como también para constituirse en un punto de confluencia de la investigación e innovación en el sector forestal.

Un aspecto importante por mejorar sería incrementar la participación de instituciones y empresas en el modelo de simulación. Esto significa que empresas forestales medianas y pequeñas, así como instituciones que representen a pequeños propietarios forestales, puedan ser incorporadas para así contar con una mayor representatividad de situaciones y regímenes de manejo. Hoy se discute la necesidad de que la Corporación Nacional Forestal pueda ser parte de este consorcio, de manera de poder extender los beneficios de los modelos de simulación de crecimiento a todos los propietarios forestales, sin exclusión de tamaño.

Dada la alta calidad del producto generado, sería muy atractivo evaluar su posible internacionalización a través de empresas chilenas que tengan activos forestales en otros países. Esto forzaría a flexibilizar el modelo, permitiendo una mayor adaptación a diferentes realidades de cultivos forestales.

Aún cuando resulta difícil de precisar, los beneficios del MNS a lo largo de estos 25 años se estima que superan holgadamente los costos en que se ha incurrido, y testimonio de ello es el renovado interés de las empresas participantes de continuar desarrollando esta herramienta. Líneas emergentes de desarrollo del MNS pretenden incorporar variables

ambientales, fisiológicas y de suelos a la predicción de productividad, secuestro de carbono y uso de agua en plantaciones forestales, lo que permitiría simular, adicionalmente a sus usos tradicionales, escenarios de cambio global, nuevas técnicas de establecimiento, mejoramiento genético y nuevas intervenciones silviculturales, entre otras. Lo anterior requerirá continuidad en el MNS con una visión y compromiso de mediano plazo que desafortunadamente excede el alcance de los fondos y concursos públicos de investigación actualmente disponibles. En la actualidad, el MNS es un bien privado, pero con acceso público, lo que permite que cualquier persona mediante un pequeño pago pueda acceder a las simulaciones de crecimiento. A futuro se plantea la idea de incorporar como parte del Consorcio MNS a la Corporación Nacional Forestal (Conaf), lo que permitiría a pequeños productores forestales contar con asesoramiento y acceso a los simuladores. Si se entiende innovación como un instrumento de creación de riqueza basado en nuevo conocimiento, entonces el Modelo Nacional de Simulación (MNS) ha permitido todo ello, al proveer información oportuna para la toma de decisiones y valorizar las plantaciones forestales del país. Además, el proyecto ha abierto las puertas para la futura internacionalización del modelo en Brasil y Uruguay. Finalmente, creemos que el MNS representa un excelente ejemplo de un proyecto cooperativo de largo plazo, que ha permitido aunar esfuerzos públicos y privados y desarrollar capital humano especializado.

Literatura citada

- BOOMSMMA, D.B. y I.R. HUNTER 1990. Effects of water, nutrients and their interactions on tree growth, and plantation forest management practices in Australasia: A review. *Forest Ecology and Management*. 30:455-476.
- FENTON, R.T. y SUTTON, W.R.J. 1968. Silvicultural proposals for radiata pine on high quality sites. *New Zealand Journal of Forestry* 13(2): 220-228.
- JARVIS, P.G. 1995. Scaling processes and problems. *Plant Cell and Environment*. 18:1079-1089.
- JOHNSEN, K., L. SAMUELSON, R. TESKEY, S. McNULTY y T. Fox 2001. Process models as tools in forestry research and management. *Forest Science*. 47:2-8.
- KIMMINS, J.P., P.G. COMEAU y W. KURZ 1990. Modelling the interactions between moisture and nutrients in the control of forest growth. *Forest Ecology and Management*. 30:361-379.
- LANDSBERG, J.J. y S.T. GOWER 1997. Applications of physiological ecology to forest management. Academic Press, San Diego. 354 p.
- LANDSBERG, J.J. y R.H. WARING 1997. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*. 95:209-228.
- LANDSBERG, J. 2003. Modelling forest ecosystems: State of the art, challenges, and future directions. *Canadian Journal of Forest Research*. 33:385-397.

- MÄKELÄ, A., J.J. LANDSBERG, A.R. EK, T.E. BURK, M. TER-MIKAELIAN, G.I. AGREN, C.D. OLIVER y P. PUTTONEN 2000. Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation. *Tree Physiology*. 20:289-298.
- RAISON, R.J. y B.J. MYERS 1992. The Biology of Forest Growth experiment: linking water and nitrogen availability to the growth of *Pinus radiata*. *Forest Ecology and Management*. 52:279-308.
- PROE, M.F., H.M. RAUSCHER y J. YARIE 1994. Computer simulation models and expert systems for predicting productivity decline. In *Impacts of forest harvesting on long-term site productivity* Eds. W.J. Dyck, D.W. Cole and N.B. Comerford. Chapman & Hall, London, pp. vii, 371.
- VANCLAY, J.K. 1994. Modelling forest growth and yield: Applications to mixed tropical forests. *Cab International*. 304 pp.
- WARING, R.H., J.J. LANDSBERG y J. WILLIAMS 1998. Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production? *Tree Physiology*. 1998:129-134.

Tablas

Tabla 1. Breve cronología de los hitos más importantes a lo largo de la vida del Modelo Nacional de Simulación de Crecimiento Forestal.

1987	Diagnóstico de los Modelos de Simulación existentes en Chile - Roland Peters, Fundación Chile.
1989	Factibilidad de un proyecto nacional de modelación - Fernando Cox, Fundación Chile.
1989	Inicio del proyecto con Fundación Chile como coordinador en Santiago.
1990	Se elabora el diseño lógico del modelo y el Sistema de Banco de Datos e Información. Informes de Consultores nacionales y extranjeros sobre el desarrollo metodológico del modelo. En este año se retira Forestal Cholguán S.A. y Forestal Tornagaleones S.A. del Consorcio de Empresas.
1991	Construcción del Prototipo del Simulador Radiata versión 1.0 en lenguaje C.
1992	Diseño de la Red de ensayos del Modelo Nacional de Simulación.
1993	Entrega del Simulador Radiata versión 2.06. Implementación del Simulador Radiata modo Batch. Traslado de la sede del proyecto a la ciudad de Valdivia. Entrega de la primera versión del Sistema de Manejo de Datos e Información. Reincorporación de Forestal Cholguán S.A. al Consorcio de Empresas. Retiro del Instituto Forestal del Consorcio de Empresas.
1994	Entrega del Simulador Radiata versión 3.01. Entrega del Simulador Radiata versión 3.02. Reincorporación de Forestal Tornagaleones S.A. al Consorcio de Empresas.
1995	Entrega del Simulador Radiata versión 3.03. Entrega del Banco de Datos e Información actualizado a 1995. Traslado de la sede del proyecto a la ciudad de Concepción (Diciembre). Reincorporación del Instituto Forestal al Consorcio de Empresas.

-
- 1996** Entrega del Simulador Radiata versión 3.04.
 Reprogramación del Simulador Radiata en lenguajes Clipper y Fortran.
 Entrega del prototipo Radiata Plus versión 4.1.
 Licitación nuevo Sistema Banco de Datos e Información.
 Retiro del Instituto Forestal del Consorcio de Empresas.
-
- 1997** Postulación y aprobación de un proyecto FONDEF (\$ 320 millones de aporte en 4 años) para los Módulos de Establecimiento Inicial y de Utilización.
 Entrega del Simulador Radiata Plus versión 4.1.
 Entrega del nuevo Sistema de Banco de Datos e Información.
 Licitación del Sistema Validador del Modelo.
 Entrega de una Versión Estudiantil para su uso en las Universidades.
-
- 1998** Preparación y entrega del Simulador Radiata Plus versión 5.0 Beta en plataforma Windows.
 Término instalación de la Red de Ensayos y Parcelas Permanentes del Módulo de establecimiento Inicial, Proyecto Fondef D97/1015.
 Inicio Ensayos para Módulo Utilización, Proyecto Fondef D97/1015.
 Entrega actualizaciones sistemas de manejo bibliográfico (BIBLIO) y de análisis gráfico para validación de series de datos (CURVAS98).
 Reprogramación de las mediciones y disminución de costos de mantención de ensayos.
 Análisis descriptivo de la respuesta de los ensayos principales, complementarios y aportados a los distintos tratamientos de poda y raleo.
 Retiro de Bosques de Chile S.A. del Consorcio de Empresas.
-
- 1999** Actualización del Simulador Radiata Plus v 5.01 en plataforma Windows.
 Inicio del Diseño y Programación del Simulador de Módulo de Establecimiento Inicial, Proyecto Fondef D97/1015.
 Entrega de Sistemas Banco de Datos versión 3.0 y Sistema de Consultas (SISCON versión 1.0).
-
- 2000** Análisis descriptivo de ensayos de poda y raleo.
 Entrega del Sistema Validador del Simulador Radiata (versión 1.0).
 Entrega nueva versión Estudiantil a plataforma Windows a las Universidades Chilenas.
-
- 2002** Se entrega la versión 3 del simulador Eucasim, la cual es la versión más estable del simulador de eucalipto conocida a esa fecha.
 Retiro del proyecto de Forestal Arauco S.A. del Consorcio de Empresas.
 Inicio proyecto Fondef D01/1021: Simulador de Árbol Individual de Pino Radiata: Arquitectura de Copa y Calidad de Madera.
-
- 2003** Medición de ensayos de Arquitectura de Copa y Calidad de Madera.
 Diseño lógico del Simulador de Árbol Individual.
-
- 2004** Modelación de la Arquitectura de Copa
 Generación de modelos de Árbol Individual y Calidad de Madera. Versión Inicial del Modelo de Árbol Individual.
-
- 2005** Entrega del Modelo de Árbol Individual con Módulos de Proceso de Inventarios, Proyección de Árbol Individual y Calidad de Madera.
 Generación de Tablas Auxiliares de Producción (noviembre 2005), entrega y distribución gratuita al sector forestal chileno.
 Entrega del Manual Práctico de Manejo de Pino Radiata, entrega y distribución gratuita al sector forestal chileno.
-

2006	Inicio de los proyectos Modelo Nacional de Simulación de Pino Radiata y Eucalipto, con Universidad de Concepción como coordinador en Concepción (mayo). Regreso al proyecto de la empresa Forestal Arauco S.A. Postulación a INNOVA Chile para crear un Centro Regional de Modelación Forestal, el cual es finalmente rechazado. Incorporación de un módulo de manejo de <i>Eucalyptus nitens</i> en Eucasim. Retiro de la empresa Forestal Biobío por venta de sus activos.
2007	Entrega del Simulador Eucasim versión 4.4. Postulación al proyecto ODEPA sobre "Estimación del Carbono capturado en las Plantaciones". Entrega Simulador INSIGNE versiones 1.3.2 y 1.3.3.
2008	Finaliza la asesoría técnica prestada a INFOR en el marco del proyecto FDI "Desarrollo de opciones productivas de mayor valor para plantaciones de <i>Eucalyptus nitens</i>: Propuesta silvícola", durante la cual se desarrolló el simulador simplificado EUCANIT. Entrega del Simulador Insigne versiones 1.3.4 y 1.4.0.0. Entrega de una versión académica de ambos simuladores (Pino y Eucalipto) a las distintas escuelas de Ingeniería Forestal del país, en una ceremonia en la Universidad de Concepción.
2009	Postulación a INNOVA Biobío del proyecto "Modelo de Crecimiento Híbrido Multiespecie". Entrega primera versión del catastro de ensayos activos en ambos proyectos. Instalación del Sistema Multiusuario en las tres empresas asociadas. Entrega Simulador Insigne versión 1.4.2 con el validador y Simulador Eucasim versión 4.4.1 sin el validador.
2010	Incorporación del sistema Validador en Eucasim dentro del sistema Multiusuario. Actualización del sitio web www.simulador.cl con todos los documentos de trabajo. Entrega de la versión 1.4.3.5 de INSIGNE. Preparación del presupuesto y programa de trabajo enero-abril 2010 y período mayo a diciembre 2010.
2011	Diseño de nueva red de ensayos de manejo silvícola para recuperar información de esquemas de manejo de nueva silvicultura y genética en plantaciones de pino y eucalipto.
2012	Diseño y puesta en marcha de una versión beta de Simulador Multiusuario con un modelo híbrido para crecimiento de pino y eucalipto.
2013	Simulador híbrido en etapa final. Generación de una base de datos ambiental para alimentar las proyecciones con el modelo híbrido desarrollado.

Figuras



Figura 1. Las plantaciones forestales son manejadas intensivamente para la producción sustentable de pulpa y papel, madera aserrada, tableros y paneles y otros productos secundarios. Suman alrededor de 2 millones de hectáreas (2,7 % de la superficie de Chile Continental) de las especies *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* principalmente.

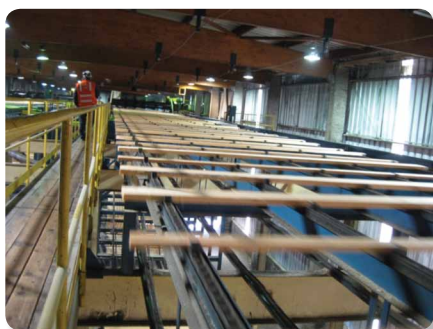


Figura 2. La industria de pulpa y papel, del aserrío, de los tableros y paneles se encuentra verticalmente integrada a la producción sustentable de biomasa en las plantaciones forestales del país. El procesamiento de la biomasa de las plantaciones por la industria forestal genera alrededor de 6 mil millones de dólares en divisas para el país anualmente (7,3 % total de exportaciones).

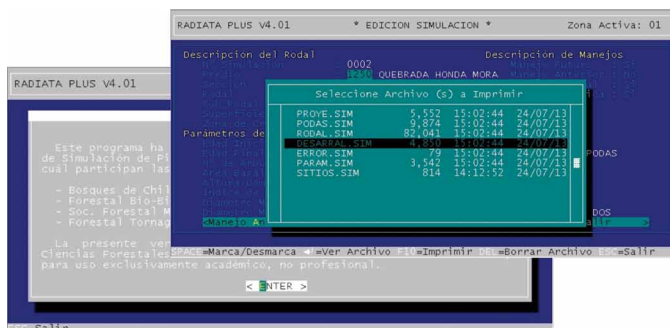


Figura 3. Actividades silvícolas, de transporte y cosecha y de exportación generan más de 100 mil empleos permanentes para el país, y con una proyección de crecimiento anual del 5 %.

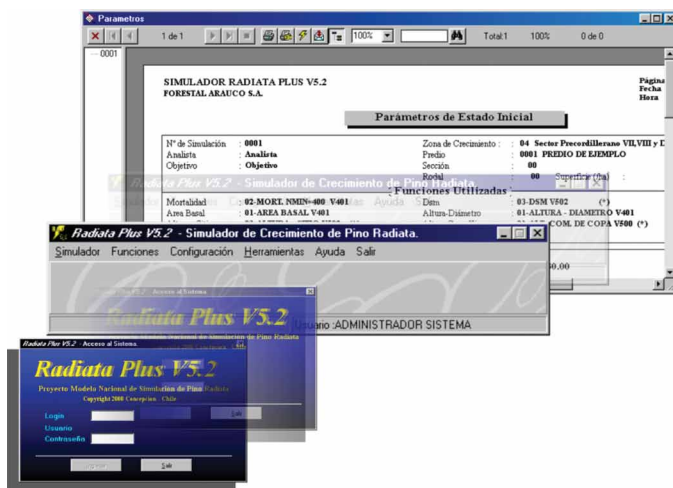


Figura 4. Los beneficios ambientales de las plantaciones forestales no han sido reconocidos en su real dimensión: protección de suelos erosionados abandonados, secuestro de gases de efecto invernadero, potencial de albergar biodiversidad de flora y fauna en algunas etapas de desarrollo, etcétera.

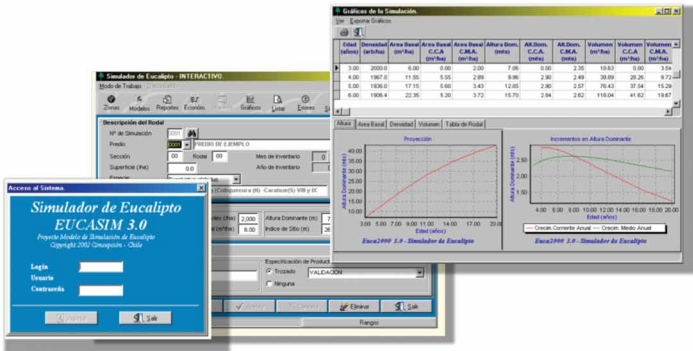
Figura 5. Un modelo de crecimiento permite proyectar el desarrollo de un rodal forestal sujeto a distintas intervenciones silviculturales (e. g. podas y raleos), en distintos suelos y zonas de crecimiento. Algunas pantallas de RADIATA PLUS (a, año 1997; b, año 2000), EUCASIM (c, año 2002) y Banco de Datos (d, Año 2012).



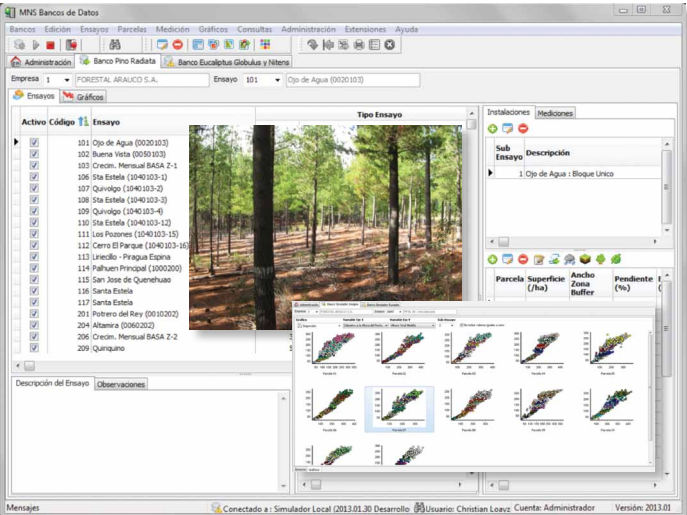
a) año 1997.



b) año 2000.



c) año 2002.



d) año 2012.



Figura 6. La página web del proyecto (www.simulador.cl) otorga una visión general del Modelo Nacional de Simulación. Es un buen lugar donde encontrar algo de la historia, potenciales aplicaciones, documentos del modelo y contactos.

Anexo 1

Financiamiento	Fuentes	Privada/Pública
	Montos	US\$ 12 millones / US\$ 1 millón
Tiempo involucrado <i>(desde la idea a la innovación)</i>	25 años	
Patentes o registros de protección industrial <i>(INDICAR QUÉ TIPO DE PROTECCIÓN SE REALIZÓ)</i>	Solicitudes <i>(n° de solicitudes)</i>	Nacionales: 0
		Internacionales: 0
	Concesiones <i>(n° de Patentes)</i>	Nacionales: 0
		Internacionales: 0
Investigadores/gestores	Equipo Técnico Actual: Roland Peters (Director) Pedro Real Hermosilla (Sub-Director) Cristian Higuera (Investigador Pino Radiata) Luis Letelier (Investigador Eucalyptus) Silvia Niebuhr (Investigador Ensayos) Christian Loayza (Informática) (www.simulador.cl) Directorio del Proyecto: Juan Carlos Valencia Jorge Goffard Jaime Sánchez Equipo Técnico Empresas: Alfred Kroegger-Sandra Fuenzalida- Cristian Montes-Julio Tobar-Sandro Díaz- Germán Otárola-Víctor Guerrero	
Industria que adoptó la innovación	Forestal Mininco S. A. Bosques Arauco S. A. Masisa S. A. Cambium S. A.	
Inversión en la innovación	Indicar montos de dinero que la(s) empresa(s) ha(n) comprometido para financiar otros proyectos. Confidencial Indicar si la(s) empresa(s) tiene(n) disposición para financiar nuevos proyectos relacionados con la innovación. Probablemente en el marco de la Ley N° 20.241 de Incentivo Tributario a la Inversión Privada	

ÁREA INGENIERÍA ESTRUCTURAL

Sistemas de protección sísmica mediante aislación basal y disipación de energía

Mauricio Sarrazin (Coordinador),
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,
Universidad de Chile, Santiago, Chile.

José L. Almazán,
Facultad de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Tomás Guendelman,
IEC Ingeniería S. A., Santiago, Chile.

María O. Moroni,
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,
Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Rodrigo Retamales,
RBA Ingenieros, Santiago, Chile.

Resumen

Los sistemas de protección sísmica representan una alternativa al diseño tradicional en la cual se reduce la energía que ingresa a la estructura mediante aislación en la base y/o se disipa la energía que capta la estructura mediante dispositivos especiales que no sufren daño o que pueden ser reemplazados después de un terremoto. Con esto se logra que la estructura mantenga su capacidad resistente y que disminuya el daño de los elementos no-estructurales y el contenido del edificio. Este método alternativo de protección sísmica se ha desarrollado con éxito en nuestro país desde comienzo de los años 90, gracias a varios proyectos de investigación y desarrollo financiados con recursos públicos, como FONDECYT

y FONDEF, al apoyo de los ministerios de Obras Públicas y de Vivienda y Urbanismo y al trabajo de las universidades.

El empleo de aislación sísmica en edificios comenzó en nuestro país con un prototipo de cuatro pisos (edificio de la Comunidad Andalucía 1992) a lo cual siguió el puente Marga Marga (1996). La misma tecnología de protección sísmica se aplicó luego en edificios emblemáticos, tales como la Clínica San Carlos de Apoquindo de la Universidad Católica (2000), y el Hospital Militar (2004), entre otros. En el edificio Titanium, de 55 pisos, se incorporó por primera vez en Chile disipadores de energía de tipo metálico (2010).

Las experiencias anteriores fueron formando en el país un importante acervo de conocimientos sobre esta tecnología y una creciente capacidad de fabricación y ensayo de los dispositivos de aislación y disipación de energía. Al mismo tiempo, se desarrolló la normativa para el diseño de edificios con aislación sísmica (norma NCh2745 Of. 2003) y se encuentra concluido el borrador de norma para edificio con disipadores pasivos de energía. Otras formas de aislación se denominan activas y semi-activas, pero no se incluyen en esta norma.

El terremoto del 27 de febrero de 2010 creó en la población una demanda por mayor protección sísmica, de tal forma que hoy hay construidos, en construcción o en proyecto, alrededor de 50 estructuras con estos sistemas antisísmicos.

Esta innovación tiene un potencial mercado internacional, especialmente en países vecinos con problemas sísmicos similares.

I. Introducción

La acción sísmica controla el diseño estructural en la mayoría de las obras en Chile. Las ondas sísmicas provocan un movimiento en la base de la estructura haciéndola vibrar, produciendo así una acumulación de energía cinética y deformación elástica dentro de ésta. La energía cinética conlleva aceleraciones en la estructura que provocan fuerzas sobre los contenidos y elementos, y deformaciones que solicitan directamente a sus miembros resistentes y a los elementos secundarios susceptibles de dañarse por tales deformaciones. La estructura se “defiende” de estas acciones mediante su resistencia y su capacidad para disipar energía por deformaciones plásticas, aunque esto último significa daño. Es decir, la estructura puede mantenerse en pie, pero a costa de disminuir su resistencia después de cada terremoto. Históricamente, las normas sísmicas elaboradas en el país –y en el mundo–, se han preocupado de estimar las fuerzas equivalentes que el sismo imprime a las estructuras, y de fijar criterios de diseño para limitar los daños que en ellas se produzcan.

Los sistemas de protección sísmica representan una alternativa al diseño tradicional en la cual se reduce la energía que penetra a la estructura mediante aislación en la base y/o se disipa la energía que capta la estruc-

tura mediante dispositivos especiales que no sufren daño o que pueden ser reemplazados después de un terremoto. Con esto se logra que la estructura mantenga su capacidad resistente y que disminuya el daño de los elementos no-estructurales y contenidos del edificio. Los dispositivos de aislación sísmica son principalmente de elastómeros o goma natural de bajo o alto amortiguamiento, con o sin núcleo de plomo como elemento disipador de energía (Figura 1a), y de tipo deslizante friccional, ya sea plano o de superficie cóncava (Figura 1b). La disipación de energía se obtiene con dispositivos viscosos, visco-elásticos, friccionales o metálicos (Figura 2).

Este novedoso método alternativo de protección sísmica se ha desarrollado con éxito en nuestro país desde comienzos de los años 90, gracias al apoyo de varios proyectos de investigación y desarrollo financiados con recursos públicos, como FONDECYT y FONDEF, al apoyo de los ministerios de Obras Públicas y de Vivienda y Urbanismo y al trabajo de las universidades. El uso de aislación sísmica comenzó con un edificio prototipo de cuatro pisos (edificio de la Comunidad Andalucía, 1992, Ficha 1) y luego con el puente Marga Marga (1996, Ficha 2). La inversión aproximada de este desarrollo fue del orden de 1500 millones de pesos, incluyendo la instrumentación de las obras, el equipamiento de laboratorios, los ensayos de prototipos, la capacitación de ingenieros y la difusión de la tecnología.

Esta misma tecnología de protección sísmica se aplicó en edificios emblemáticos, tales como el nuevo Hospital Militar (2004, Ficha 3), el Hospital Clínico San Carlos de Apoquindo de la Universidad Católica (2000, Ficha 4), y el edificio San Agustín de la Facultad de Ingeniería, también de la Universidad Católica (2002, Ficha 5). En el edificio Titanium de 55 pisos (2010, Ficha 6) se incorporaron por primera vez en Chile disipadores de energía metálicos. Todas estas obras tuvieron excelente desempeño durante el terremoto del 27 de febrero de 2010.

Las experiencias anteriores fueron formando en el país un importante acervo de conocimientos sobre esta tecnología y una creciente capacidad de fabricación y ensayo de los dispositivos de aislación y disipación de energía. Al mismo tiempo, se desarrolló la normativa de referencia con los criterios mínimos a ser considerados por los diseñadores de los sistemas de aislación (norma NCh2745 Of. 2003) y se escribió un borrador de norma para estructuras con disipadores pasivos de energía. En general, el conocimiento adquirido es público, aunque hay en desarrollo algunas patentes de dispositivos particulares.

El terremoto del 27 de febrero de 2010 mostró que algunas estructuras de tipología tradicional eran vulnerables ante los sismos o sufrían importantes daños, lo cual creó en la población una demanda por mayor protección sísmica, especialmente de sistemas de aislación basal, de tal forma que hoy hay construidos, en construcción o en proyecto, alrededor de 50 estructuras con estos sistemas antisísmicos, lo cual muestra una tecnología ya madura. Estimando una inversión del orden de US\$ 300.000 por edificio, se alcanzaría un total de US\$15.000.000.

Esta innovación tiene un potencial mercado internacional, especialmente en países vecinos con problemas sísmicos similares. En Mendoza se construyó en el año 2003 un edificio de tres niveles con asesoría chilena. En Lima se está construyendo un edificio educacional con asesoría chilena y aisladores sísmicos fabricados en Chile.

II. Principales aspectos que inciden en el área de la protección sísmica

a) Innovación en el área de Ingeniería Estructural. Límites de aplicabilidad, actividades que incluye, excluye o que debiera incluir.

La innovación en el área de Ingeniería Estructural responde a mejorar el comportamiento de las estructuras, principalmente ante el efecto de los sismos. Cada evento sísmico pone a prueba los procedimientos de diseño y las innovaciones o provoca el estudio de nuevas soluciones. El uso de estas innovaciones se plasma en las normativas de diseño sísmico y de materiales. El levantamiento de daños post sismo y la instrumentación de estructuras es fundamental para verificar su comportamiento.

En efecto, la acción sísmica controla el diseño estructural en la mayoría de las obras de ingeniería en Chile, por lo cual es esencial conocer la génesis de los sismos que ocurren en el país y el efecto que tienen en las construcciones. A pesar de existir un conocimiento general sobre estos temas, esto debe estudiarse a nivel local pues los sismos, suelos, tipologías y materiales de construcción, tienen características específicas en cada lugar.

Cada terremoto ocurrido en Chile en el siglo XX marcó un hito en el desarrollo de la Ingeniería Estructural, ya sea por la constatación del buen o mal desempeño de las construcciones, como por el efecto que tuvo en la implementación de normas sísmicas. En particular, tanto la norma de diseño sísmico NCh433 como la de diseño de construcciones de hormigón armado NCh430 se modificaron con posterioridad al Terremoto del Maule del 27/02/2010, dado el desempeño inadecuado de algunos edificios de hormigón armado construidos en el último decenio (Massone y Rojas, 2012).

b) Posicionamiento del área en el ámbito nacional o internacional.

La ocurrencia frecuente de sismos en Chile ha creado una cultura de protección sísmica en la comunidad profesional relacionada: arquitectos, ingenieros, constructores e inspectores técnicos de obra, que ha permitido salvar con bastante éxito y relativamente pocas víctimas fatales, los

grandes terremotos ocurridos en Chile. Tanto es así que algunos terremotos muy importantes del siglo pasado no aparecen en las estadísticas mundiales cuando se ordenan por el número de víctimas causadas, en vez de su magnitud o energía liberada. Esto habla muy bien del desarrollo de la Ingeniería Estructural en el país.

c) Situación actual de desarrollo de la innovación en su área específica. Efecto en los mercados mundiales y existencia de mecanismos generales de estímulo.

La filosofía de diseño de la mayoría de las normas sísmicas en el mundo se ha basado en no aceptar daños ante sismos frecuentes, aceptar daños moderados ante sismos más severos y evitar el colapso de las estructuras ante los grandes terremotos. Sin embargo, las pérdidas económicas que han ocurrido producto de terremotos que han afectado zonas muy pobladas y económicamente muy activas han llevado a revisar dicha filosofía. Es en este contexto, que el uso de sistemas de protección sísmica que sirvan no sólo para evitar el colapso, sino que para mejorar el desempeño y el confort de los usuarios, ha tenido un gran impacto.

Desde el siglo pasado se han propuesto numerosos dispositivos para desacoplar el movimiento de las construcciones de las vibraciones del suelo durante terremotos, con el fin de proteger sus estructuras, componentes no-estructurales y contenidos. Los primeros sistemas se basaban en elementos deslizantes colocados entre el suelo y la estructura, tales como una capa de arena (China, 1980), o rodamientos (usados en sendos edificios en Ciudad de México, 1974 y Sebastopol, Ucrania, 1980). Incluso existe una patente en San Francisco, EEUU, que data de 1870 consistente en un apoyo de bolas entre dos superficies curvas, muy similar al moderno sistema del péndulo de fricción de doble superficie cóncava que se emplea hoy. La primera aplicación a un edificio de importancia en los EEUU data de 1985, ciento quince años después de la mencionada patente: el edificio del Centro de Justicia de Foothill, en Rancho Cucamonga, California.

Existen actualmente alrededor de 20.000 estructuras en 30 países protegidas mediante aislación sísmica o algún otro sistema de disipación sísmica. Por lejos, el país con más aplicaciones es Japón, con más de 6.600 edificios. Le siguen en número de aplicaciones China, Rusia, Italia y Estados Unidos. En todos esos países hay empresas que fabrican aisladores. Las patentes, si las hubo, parecen no interferir en la creación de nuevas empresas dedicadas a este rubro. Interesante es la experiencia de Japón, donde dichas empresas fueron las que primero promovieron el uso de aisladores, construyendo edificios prototipo, los que instrumentaron y realizaron en ellos todo tipo de experimentos para comprobar y convencer de su buen funcionamiento.

Edificios equipados con sistemas de aislación en la base han sido probados en grandes terremotos destructivos ocurridos en años recientes, tales como Northridge, 1994, Kobe, 1995, Maule, 2010, Canterbury, 2010, Christchurch, 2011 y Tohoku, 2011 (Kasai, K, Pu, W.C. & Wada A., 2012). Su buen comportamiento ha servido para promocionar y aumentar el uso de estos sistemas. Al revisar las estadísticas es notorio el aumento en número de edificios aislados después de cada evento. Lo mismo se puede decir respecto a los puentes. Sin embargo, en el caso del terremoto de Tohoku, si bien los puentes resistieron bien el movimiento del suelo, aquéllos sometidos posteriormente a la acción del maremoto fueron destruidos por efecto del empuje de la ola que los hizo volcar en el sentido de la corriente. Esta vulnerabilidad a la acción de los maremotos, que bien podría darse también en edificios aislados, debería ser considerada al proyectar puentes y edificios con aislación basal en zonas inundables.

d) Propensión a la innovación de esta área en el país.

Factores que la estimulan y que la limitan.

La ocurrencia frecuente de terremotos en el país ha condicionado las características de las estructuras. A diferencia de otros países latinoamericanos o europeos, casi no contamos con edificios antiguos importantes de adobe o albañilería sin reforzar. Lo más característico en cuanto a tipo estructural ha sido el llamado “edificio chileno de muros”, el cual hasta el terremoto de 1985 era una tipología alabada mundialmente. Todo lo demás, incluidos los aisladores sísmicos, corresponde a transferencia y adaptación de tecnología desarrollada en el extranjero a nuestro medio profesional. Por lo tanto, es necesario formar profesionales ilustrados que entiendan las ventajas y desventajas de los productos que se les ofrecen y las condiciones en que dichos productos pueden funcionar.

A pesar de que las condiciones sísmicas transforman al país en un laboratorio natural a escala real, los resultados de estos experimentos se obtienen muy de vez en cuando (cada 10 a 25 años). Por lo tanto, la carencia de instalaciones para realizar investigación experimental de estructuras ha sido un escollo difícil de superar.

III. Analisis de un ejemplo específico

i) Ciencia básica

Como se ha expresado anteriormente, el diseño estructural consiste en determinar los esfuerzos y deformaciones a que quedará expuesta una estructura ante diversas acciones y luego proveer elementos con capacidades suficientes. La acción sísmica se puede representar por medio del llamado espectro de aceleraciones, que corresponde a la máxima acele-

ración (fuerza por unidad de masa) que puede alcanzar un sistema de un grado de libertad sometido a un movimiento sísmico, dado un cierto amortiguamiento. Un típico espectro de aceleración se muestra en la Figura 3a, donde se observa que a medida que el período natural de la estructura y el amortiguamiento aumentan, las aceleraciones disminuyen, por lo que convendría tener estructuras lo más flexibles y amortiguadas posibles. Sin embargo, a mayor flexibilidad, los desplazamientos también aumentan, salvo que el amortiguamiento sea significativo (Figura 3b). Ese es exactamente el rol que cumple la aislación sísmica: flexibilizar la estructura (aumentar su período natural) y aumentar el amortiguamiento. En el caso de los disipadores de energía, su uso es recomendado para estructuras que ya son flexibles, por lo que éstos aportan mayor amortiguamiento para disminuir las aceleraciones y deformaciones.

El comportamiento de las estructuras con aisladores sísmicos se puede representar con gran precisión por medio de las ecuaciones de la dinámica de estructuras convencional (lineal). Diferente es el caso de estructuras con disipadores de energía, pues al estar éstos ubicados en posiciones discretas, no se pueden usar los modos clásicos (no amortiguados) de vibrar, ni calcular la matriz de amortiguamiento como función de las matrices de masa y rigidez, con lo cual no se puede usar el método de superposición modal para calcular su respuesta. Además, el comportamiento es altamente no lineal, lo que dificulta la estimación del amortiguamiento equivalente del sistema, característica principal que se usa para comparar y/o defender un sistema respecto de otro.

Los conocimientos de mecánica de sólidos necesarios para modelar y simular el comportamiento sísmico de los elastómeros también están al alcance de la mayoría de los especialistas.

ii) Origen de la idea

La investigación teórica y experimental de los sistema de aislamiento sísmico se inició en Nueva Zelanda y USA en los años 60-70. Fueron los académicos de la Universidad de Chile quienes introdujeron la aislación sísmica en el país. Gracias al contacto con el profesor James Kelly de la Universidad de California, Berkeley, se pudo construir el primer edificio aislado en Chile en el año 1992. El profesor Kelly, unos de los “padres” de la aislación sísmica, proporcionó la fórmula química del elastómero, con lo cual se pudo contactar empresas fabricantes locales de productos de goma para que las reprodujeran en el país. En esta búsqueda se contó con el apoyo de dos empresas: Ricardo Heresi y VULCO. Las autoridades del MINVU y el arquitecto Sr. Jaime Castillo Velasco, aceptaron que uno de los edificios de la Comunidad Andalucía tuviera este diseño innovador y el ingeniero a cargo aceptó este gran desafío.

iii) Escala de tiempo necesaria para que la idea evolucionara a un estado precompetitivo.

Como se mencionó anteriormente, la primera aplicación en Chile se plasmó el año 1992, con la construcción de un edificio aislado sísmicamente en el conjunto Comunidad Andalucía, localizado en la Comuna de Santiago. Este proyecto contó con el apoyo de las autoridades del MINVU de la época, la Universidad de Chile y la empresa VULCO. Consiste en un edificio de hormigón armado y albañilería confinada de 4 pisos, soportado por 8 aisladores de goma de alto amortiguamiento, reforzada con láminas de acero. Un par de prototipos se ensayaron en la Universidad de California, para comparar los resultados con los ensayos efectuados en IDIEM con equipos rudimentarios. Este edificio, junto a otro gemelo sin sistema de aislación, ha sido monitoreado en forma permanente mediante una red de acelerómetros, obteniéndose invaluable información sobre el comportamiento de edificios con aislación sísmica a través de los numerosos registros obtenidos, (Moroni, M.; Sarrazin, M. & Boroschek, R., 1998).

En el año 1996 se construyó el puente Marga-Marga de Viña del Mar, el primer puente aislado en Chile, también con aisladores de goma natural de alto amortiguamiento fabricados en el país. En este caso, la empresa G+V calculista del puente, Fe Grande constructora y las autoridades del MOP de la época fueron los actores principales en esta iniciativa. El puente se encuentra instrumentado con una red de 24 acelerómetros perteneciente a la Universidad de Chile que ha registrado todos los sismos de mediana y gran intensidad a que ha estado sometido desde su construcción. Posteriormente, se construyó el puente Amolanas, en el Km 308 de la Carretera Panamericana Norte (**Ficha 7**), con un sistema de aislación sísmica de tipo deslizante y amortiguadores viscosos, el cual se encuentra instrumentado con acelerómetros y sensores de desplazamiento. Es destacable mencionar, también, que el viaducto de la línea 5 del metro de Santiago se encuentra apoyado en aisladores de neopreno y uno de sus tramos, adyacente a la estación Mirador (**Ficha 8**), está instrumentado con acelerómetros habiéndose registrado los sismos que han afectado al lugar desde 1998 (Sarrazin *et al.*, 2013).

En los últimos años, el uso de sistemas de protección sísmica de edificios se ha extendido en Chile. Se han construido, o están en etapa de proyecto, más de 20 edificios de alturas de hasta 28 pisos y cerca de 10 puentes o viaductos con aisladores de goma natural de alto amortiguamiento o deslizantes. A esto hay que agregar obras de otro tipo, como los telescopios VLT de Cerro Paranal, estanques de GNL de Ventanas y Mejillones, centros de datos de Claro y HP, hospitales de Universidad de Los Andes, Militar, de Talca, La Florida, Maipú, El Salvador, Posta Central y Antofagasta, el templo Baha'i en Santiago y un muelle en Coronel, la mayoría con aisladores elastoméricos con núcleo de plomo. Los que estaban ya construidos soportaron en forma excelente el Terremoto del Maule,

con desplazamientos en la base de entre 8 y 12 cm, valores similares a los medidos en varios de los 130 edificios aislados en las zonas afectadas por el terremoto de Tohoku de 2011.

Además de los sistemas de protección sísmica de aislación basal, y a veces como complemento de ellos, se debe mencionar el uso de disipadores de energía, dispositivos que se instalan dentro de la estructura para disminuir las vibraciones. Son principalmente de tres tipos: viscosos, friccionales y metálicos. Se usan principalmente en estructuras flexibles y son muy efectivos para reducir el movimiento debido al viento, pero no son tan eficaces como la aislación basal para proteger las estructuras de los efectos adversos de los sismos. Sin embargo, son muy eficientes cuando el movimiento del suelo es de tipo armónico, como suele ocurrir en estructuras fundadas sobre suelo blando, tal como el de ciudad de México. Una aplicación muy destacable es el edificio Titanium, de 55 pisos, que tiene incorporado un sistema de disipación de energía de tipo metálico, el cual tuvo un buen comportamiento durante el último gran sismo, aunque la intensidad de éste sólo hizo trabajar a los disipadores en forma leve, por lo que no fue necesario su reemplazo luego del sismo.

iv) Expectativas iniciales que no se vieron satisfechas en el caso de no haber tenido éxito.

A pesar de que se ha demostrado que la aislación sísmica funciona muy bien, hay que reconocer que no es la única forma de evitar colapsos o promover un buen comportamiento de las estructuras, por lo cual hay que ser cuidadosos al momento de recomendar estas soluciones.

Por ejemplo, los edificios de hasta 4-5 pisos (la mayoría del mundo de vivienda social) de albañilería confinada diseñados de acuerdo a la Norma NCh2123 han tenido un muy buen comportamiento sísmico a un costo razonable. En el caso del edificio de la Comunidad Andalucía, el costo del sistema de protección y obras anexas representó un 25% adicional respecto del costo de uno con fundación convencional.

Es importante mencionar que los sistemas de aislación sísmica requieren la implementación de un plan de inspección (y eventual reemplazo) de los aisladores y de las juntas de aislación durante la vida útil de la estructura, por lo que los usuarios deben estar conscientes de esta situación. Esto representa una limitación para su uso masivo en viviendas sociales, salvo que algún servicio estatal tome ese compromiso.

v) Fondos de financiamiento público y privado que permitieron la materialización de la idea.

Varios proyectos financiados por Conicyt han contribuido al estudio, desarrollo e implementación de estas tecnologías. Fondecyt ha financiado

alrededor de 10 proyectos relacionados con sistemas de protección sísmica, lo que permitió instalar este tema en la comunidad científica y profesional. Además, han sido fundamentales para instrumentar algunas estructuras con protección sísmica, permitiendo verificar su mejor desempeño respecto de las convencionales. Un rol parecido jugó el programa de Innovación Tecnológica del MOP, cuyos fondos sirvieron para instrumentar el Puente Amolanas.

Por otra parte, dos proyectos FONDEF (1996 y 2009) y un proyecto FONDEQUIP (2012) permitieron equipar el laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Católica de Chile con modernos sistemas para ensayar todo tipo de dispositivos de protección sísmica. Actualmente es el único laboratorio del país con capacidad para ensayar aisladores sísmicos y disipadores de energía a escala natural.

Sin embargo, los montos financiados por estos proyectos, del orden de mil quinientos millones de pesos, aparecen muy modestos cuando se comparan con los obtenidos por investigadores de la Comunidad Europea o Estados Unidos (NEES, MANSIDE, SISMO, etc.).

vi) Principales impulsos recibidos y obstáculos que hubo que vencer.

El éxito o fracaso depende mucho de la confianza que pueden tener las autoridades (MINVU, MOP) en estos proyectos. Algunos han sido infranqueables y otros muy apoyadores, especialmente en la etapa de instrumentar estas estructuras para verificar su comportamiento ante sismos reales.

vii) Principales aspectos que se identifican como muy importantes en el éxito o el fracaso del caso de estudio.

El mayor impulso que han recibido los sistemas de protección sísmica ha sido su excelente comportamiento durante el terremoto del Maule, especialmente las estructuras con aislación sísmica. Un hito muy importante fueron los registros de aceleración obtenidos en los edificios de la Comunidad Andalucía. Durante el terremoto del Maule, las aceleraciones máximas horizontales de techo en el edificio aislado fueron una cuarta parte de las registradas en el edificio de base fija (Figura 4), lo que muestra la efectividad del sistema de protección. En la dirección vertical, las respuestas en el techo de ambos edificios fueron similares. El edificio con aislación sísmica no presentó ningún tipo de daño estructural, mientras que el gemelo, sin aislación, presentó algunas fisuras en un muro de albañilería del 2º piso (Moroni *et al.*, 2012).

Aunque este fue el único edificio aislado que contaba con instrumentación sísmica, comportamientos similares se observaron en todos los edificios equipados con esta tecnología. Sin embargo, de aquí no se puede

extrapolar que todos los edificios con aisladores tendrán comportamiento similar. Por ello es muy importante que los edificios con sistemas de protección sísmica se instrumenten para verificar su comportamiento, en especial los de mayor altura y los ubicados en suelos no muy competentes.

También hay que destacar la participación de la Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica, ACHISINA, en el desarrollo de la norma NCh2745.Of 2003 “Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica”, que ha permitido el diseño de numerosos edificios con aisladores con posterioridad al de la Comunidad Andalucía.

viii) Papel del ámbito académico en la evolución relatada en los puntos anteriores. Receptividad a la idea original. Recursos humanos disponibles.

Sin duda, el ámbito académico ha constituido líneas de investigación en varias universidades del país. La enseñanza de la Ingeniería Estructural de las principales Universidades de Chile es y ha sido de primer nivel, por lo cual no ha habido limitaciones para que participen sus profesionales o estudiantes en el desarrollo de estas innovaciones. Durante los primeros años (1985-1995) la mayor parte del trabajo ha sido realizado por la vía de memorias de título o tesis de magíster, y una vez que se publica la norma NCh2745.Of2003, comienzan las contribuciones de empresas de ingeniería.

ix) Aspectos legales.

Desde el punto de vista legal no hay restricciones para incluir aislación sísmica en estructuras, si se diseña de acuerdo a la norma NCh2745. Además, las normas NCh433, Diseño Sísmico de Edificios y NCh2369, Diseño Sísmico de Edificios e Instalaciones Industriales, también tienen disposiciones para los casos que no se cubren en forma estándar.

Sin embargo, no existe una norma para el diseño de edificios que incorporen disipadores de energía. La Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica, ACHISINA, ha elaborado un borrador de norma para este caso, la cual fue presentada al Instituto Nacional de Normalización.

x) Otras experiencias relevantes en el área.

Sin duda, la experiencia de Japón es una de las más interesantes, tanto por la gran cantidad de estructuras con estos sistemas de protección sísmica, la cantidad de registros que han obtenido, especialmente durante el terremoto de Tohoku de 2011, y la cantidad de trabajos publicados sobre el comportamiento de dichas estructuras durante ese sismo (Takayama *et al.*, 2012).

IV. Aspectos institucionales que han influido en el ejemplo.

- a) Esta contribución nace por iniciativa de los investigadores que trabajan en las Universidades, quienes gozan de libertad para elegir sus temas de investigación, y se espera que a medida que tengan resultados los publiquen en revistas especializadas. Los primeros desarrollos teóricos no involucran mucho gasto y se pueden realizar con cargo a presupuesto universitario. Distinto es el caso en que se requiere hacer investigación experimental, pues ahí es fundamental acudir a otras instituciones como Conicyt, para financiar la compra de equipamiento de laboratorio y realización de ensayos. El programa del MOP sobre innovación tecnológica, aunque modesto, jugó un rol importante para instrumentar el puente Amolanas.

El rol de las empresas no fue diferente de lo que se observa en muchas otras áreas. En los comienzos de este proyecto se visitaron varias empresas dedicadas al rubro de las gomas y sólo un par de ellas estuvieron disponibles a colaborar, aportando sus instalaciones y personal, pero de ningún modo financiamiento directo.

- b) Hasta la aparición de los proyectos Fondef, sólo estuvieron disponibles los recursos de Fondecyt, que dejan un porcentaje bastante menor para la compra de bienes de capital (la mayor parte se destina a honorarios y remuneraciones). Además, el área de Ingeniería Estructural apareció con bastante atraso en las listas de áreas prioritarias (a través de infraestructura).
- c) El nivel de formación de los profesionales y técnicos que ha participado en el desarrollo de la innovación es apropiado. Todas las universidades tradicionales que forman ingenieros estructurales dan una preparación adecuada en diseño sísmico y varias tienen como cursos electivos materias más especializadas, como diseño de estructuras con protección sísmica.

V. Conclusiones y recomendaciones

Se ha presentado un innovativo método de protección sísmica de edificios que fue desarrollado en Chile a partir de los años noventa, principalmente por las universidades de Chile y Católica de Chile, con financiamiento de las propias universidades y fondos de investigación de FONDECYT, FONDEF, MOP y CORFO. Luego, estos sistemas fueron implementándose con el aporte entusiasta de ingenieros de proyecto, empresas inmobiliarias y empresas públicas, de forma tal que actualmente se cuenta con alrededor de medio centenar de edificios y puentes que disponen de estos sistemas de protección. El número de aplicaciones aumentó considerablemente luego del terremoto del Maule de 2010, donde se constató el buen comportamiento que tuvieron los pocos casos de

edificios y puentes que se encontraban contruidos en el momento del terremoto, y los registros de aceleraciones obtenidos en el edificio de la Comunidad Andalucía. Algo similar ha ocurrido en otros países, como Japón luego del terremoto de Kobe de 2005, e Italia después del terremoto de L'Aquila de 2009.

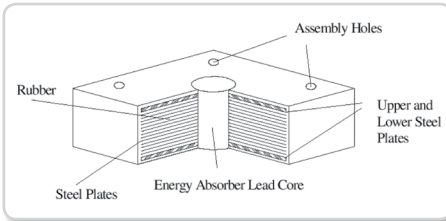
La inversión actual en el país en esta tecnología, incluyendo lo gastado en investigación y desarrollo, asciende a unos 18 millones de dólares. El conocimiento adquirido está siendo exportado a otros países de Latinoamérica.

Se recomienda continuar con el desarrollo de nuevos sistemas de protección sísmica aprovechando la ventaja comparativa de nuestro país a nivel latinoamericano y actuar a nivel de normativas de diseño, control de calidad y seguimiento de los edificios y puentes que poseen estos sistemas de protección sísmica.

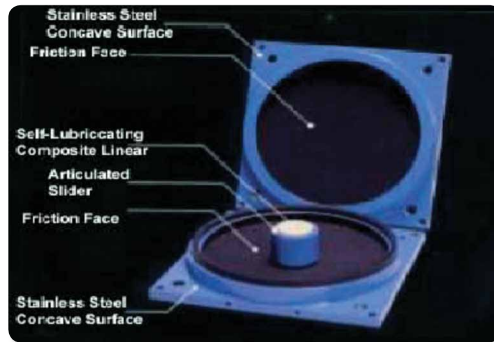
Literatura citada

- KASAI, K., PU, W.C. y WADA A. (2012). Response of Passively-Controlled Tall Buildings in Tokyo during 2011 Great East Japan Earthquake. Proc. 15 WCEE, Lisboa, Portugal.
- MASSONE L. y ROJAS F. (2012) (M.Casares, Ed.). Comportamiento de edificios de hormigón armado. En, Mw = 8.8 – Terremoto en Chile (pp. 167- 186). Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- MORONI, M., SARRAZIN, M. y BOROSCHEK, R. (1998). Experiments on a base-isolated building in Santiago, Chile. *Engineering Structures*, 20(8), 720-725.
- MORONI, M.O., SARRAZIN, M. & SOTO, P. (2012). Behavior of Instrumented Base-isolated Structures during the 27 February 2010 Chile Earthquake. *Earthquake Spectra*, 28(S1), 407-424.
- SARRAZIN, M., MORONI, M.O., NEIRA, C. y VENEGAS, B. (2013). Performance of bridges with seismic isolation bearings during the Maule earthquake, Chile. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 47, 117-131.
- TAKAYAMA M. y MORITA K. (2012). Seismic Response Analysis of Seismically Isolated Buildings using Observed Records due to 2011 Tohoku Earthquake. Proc 15WCEE, Lisboa, Portugal.

Figuras



a) Aislador de goma reforzada con núcleo de plomo.



b) Aislador de péndulo de fricción.



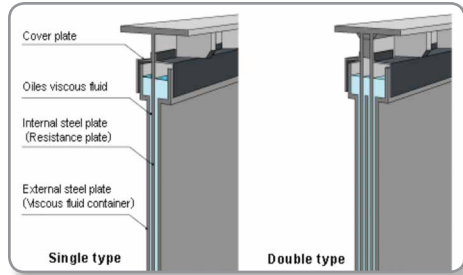
c) Aislador de resortes y su correspondiente amortiguador viscoso.

Figura 1. Aisladores de goma, fricción y resortes.

a) Disipadores viscoelásticos.

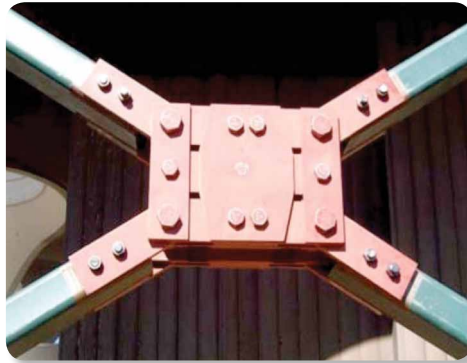


Puente Amolanas.



Muro con fluido viscoso.

b) Disipador de fricción.



c) Disipadores histeréticos metálicos.



Edificio Titanium.

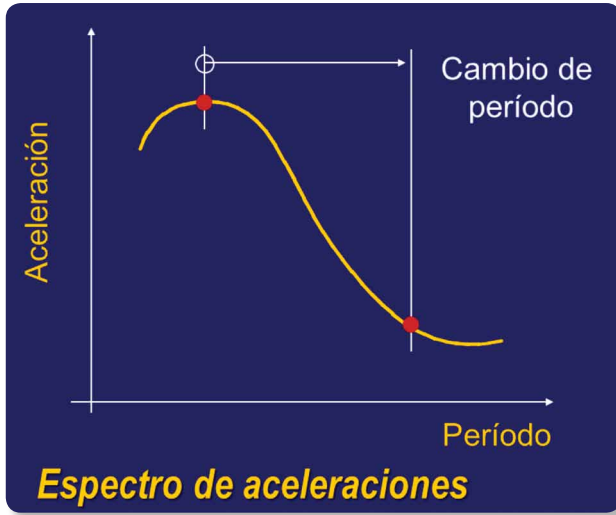


Diagonales con pandeo restringido.



Figura 2. Disipadores de energía.

a) Espectro de aceleración para un amortiguamiento dado.



b) Espectro de desplazamiento para diferentes amortiguamientos.

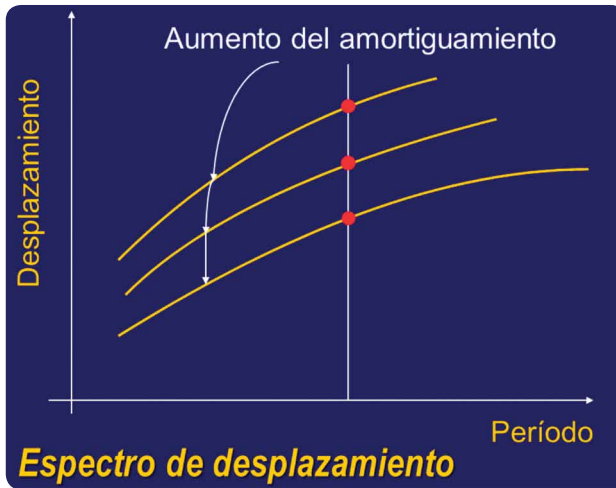


Figura 3. Espectros promedio de aceleración y desplazamiento.

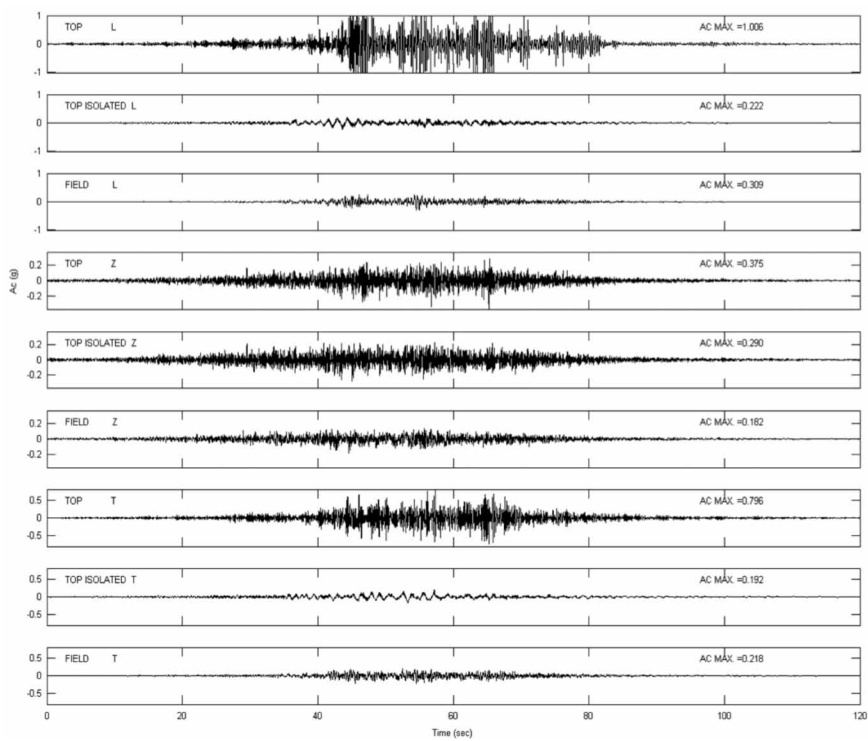


Figura 4. Registros de aceleración para el terremoto del Maule en la Comunidad Andalucía.

Anexo A: Fichas de proyectos contruidos en el país

Nombre		Edificio Andalucía	
		Dirección	Roberto del Río XXX
		Destino	Vivienda
		Fecha construcción	1992
		Estado (en uso, en construcción o proyecto)	En uso
		Nº de pisos y m² del edificio	4 pisos, 250 m²
		Materialidad del edificio	H A Primer Piso, Albañilería 2, 3 y 4
		Instrumentación	SMAI suelo, losa bajo piso 1, techo y techo edificio gemelo sin aislación
Descripción Sistema Aislación o Disipación		8 aisladores HDR de D = 30 y h = 30	
Propietario	MINVU		
Arquitecto	Fernando Castillo		
Calculista			
Constructor			

Ficha 1. Edificio Comunidad Andalucía.

Nombre		Puente Marga Marga I	
		Dirección	Rodelillo-El Salto, Viña del Mar
		Destino	Puente
		Fecha construcción	1996
		Estado (en uso, en construcción o proyecto)	En uso
		Materialidad	Vigas metálicas continuas sobre pilas de HA
		Instrumentación	Red de acelerógrafos de 24 canales
Descripción Sistema Aislación o Disipación		Aisladores de goma de alto amortiguamiento	
Propietario	MOP		
Arquitecto			
Calculista	G+V		
Constructor			

Ficha 2. Puente Marga-Marga I.

Nombre		Hospital Militar La Reina	
	Dirección	Av. Larraín 9100, La Reina	
	Destino	Hospital	
	Fecha construcción	2004	
	Estado (en uso, en construcción o proyecto)	En uso	
	Nº de pisos y superficie	4 pisos + 1 Subt., 50.000 m²	
	Materialidad	Marcos de H.A.	
	Instrumentación	No	
Descripción Sistema Aislación o Disipación		114 MDRB + 50 LRB	
Propietario	FF.AA.		
Arquitecto	Misael Astudillo		
Calculista	Hoehmann Stagno Asoc. Colaborador: SIRVE		
Constructor	OHL		

Ficha 3. Hospital Militar La Reina.

Nombre		Hospital Clínico San Carlos de Apoquindo	
	Dirección	Camino El Alba 12351, Las Condes	
	Destino	Hospital	
	Fecha construcción	2000	
	Estado (en uso, en construcción o proyecto)	En uso	
	Nº de pisos y superficie	5 pisos + 1 Subt., 8000 m²	
	Materialidad	Marcos de H.A.	
	Instrumentación	No	
Descripción Sistema Aislación o Disipación		30 HDRB + 22 LRB	
Propietario	PUC		
Arquitecto	Figueroa y Asociados		
Calculista	SIRVE		
Constructor			

Ficha 4. Hospital Clínico San Carlos de Apoquindo, UC.

Nombre		Edificio San Agustín, Fac. Ing. PUC	
	Dirección	Vicuña Mackenna 4860	
	Destino	Educación	
	Fecha construcción	2002	
	Estado (en uso, en construcción o proyecto)	En uso	
	Nº de pisos y superficie	4 pisos + 1 Subt., 6000 m²	
	Materialidad	Marcos de H.A.	
	Instrumentación	No	
Descripción Sistema Aislación o Disipación		25 HDRB + 17 LRB + 11 STS	
Propietario	PUC		
Arquitecto	Murtinho - Raby		
Calculista	SIRVE		
Constructor			

Ficha 5. Edificio San Agustín, Facultad de Ingeniería PUC.

Nombre		Edificio Titanium	
	Dirección	Av. Vitacura con Isidora Goyenechea	
	Destino	Oficinas	
	Fecha construcción	2010	
	Estado (en uso, en construcción o proyecto)	En uso	
	Nº de pisos y superficie	52 pisos + 7 Subt., 72800 m²	
	Materialidad	Muros y marcos de H.A.	
	Instrumentación	No	
Descripción Sistema Aislación o Disipación		Disipadores histeréticos de acero cada 3 pisos	
Propietario	Abraham Senerman L.		
Arquitecto	SENARQ S.A.		
Calculista	Alfonso Larraín. Consultores: SIRVE, IEC, SyS		
Constructor	SENERCO		

Ficha 6. Edificio Titanium.

Nombre		Puente Amolanas	
	Dirección	Carretera 5 Norte Km 308	
	Destino	Puente	
	Fecha construcción	2000	
	Estado (en uso, en construcción o proyecto)	En uso	
	Características	Vigas cajón continuas de acero con apoyos deslizantes	
	Materialidad	Acero de alta resistencia y H. A.	
	Instrumentación	Red de 12 acelerómetros	
Descripción Sistema Aislación o Disipación		Apoyo deslizantes en sentido longitudinal y amortiguadores viscosos	
Propietario	MOP		
Arquitecto			
Calculista	Carlos Fernández Casado		
Constructor	SACYR-CHILE		

Ficha 7. Puente Amolanas.

Nombre		Viaducto L5 Metro Santiago	
	Dirección	Av. Vicuña Mackenna	
	Destino	Viaducto Metro	
	Fecha construcción	1997	
	Estado (en uso, en construcción o proyecto)	En uso	
	Características	Vigas postensadas de apoyo simple	
	Materialidad	Hormigón Armado y Postensado	
	Instrumentación	Red de 12 acelerómetros	
Descripción Sistema Aislación o Disipación		Apoyos elastoméricos de neopreno	
Propietario	METRO de Santiago		
Arquitecto			
Calculista	CADEIDEPE		
Constructor	PRECON		

Ficha 8. Viaducto Metro de Santiago.

ÁREA INFORMÁTICA

Yahoo Labs Latin America

Ricardo Baeza-Yates (Coordinador),
Yahoo Labs Latin America, Santiago, Chile.
Departamento de Ciencias de la Computación,
Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Mauricio Marín,
Departamento de Ingeniería Informática,
Universidad de Santiago, Santiago, Chile.

Resumen

Este laboratorio es único en su tipo en Latinoamérica, siendo fundado en 2006 gracias a un convenio privado con la Fundación para la Transferencia Tecnológica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. En todos estos años, el laboratorio ha producido innovaciones que impactan los servicios y tecnología de Yahoo y aportan al mundo científico por medio de publicaciones, patentes y otras formas de divulgación. El trabajo de investigación del laboratorio se centra en tecnologías de búsqueda y minería de datos de la Web. Esta labor ha permitido que investigadores nacionales y extranjeros tuvieran acceso a datos únicos en el mundo a través de posdoctorados, investigadores visitantes y asociados y pasantías de estudiantes de posgrado.

El laboratorio también ha contratado ingenieros de software egresados de las universidades nacionales, quienes participan en el desarrollo de optimizaciones y nuevas funcionalidades para los distintos componentes que forman parte de los servicios de Yahoo. Del mismo modo, en el ámbito nacional, el laboratorio colabora con las empresas que basan sus servicios en el uso de la Web. Para ello les transfiere soluciones tecnológicas avanzadas y desarrolla junto con ellas proyectos de investigación.

En este capítulo explicaremos el proceso de innovación que se realiza en el laboratorio día a día a través de dos ejemplos exitosos de algunas

de las nuevas tecnologías de impacto mundial inventadas en Chile. Estas innovaciones son públicas, en el sentido de que pueden usarse gratuitamente a través de los servicios que Yahoo presta en la Web, aunque hayan sido financiadas de forma privada o sean resultados de proyectos Fondef precompetitivos, donde participa el laboratorio junto con empresas y universidades nacionales.

Introducción

Desde su inicio en marzo del año 2006, el laboratorio de I+D de Yahoo Labs en Chile ha tenido una producción científica fuertemente orientada a la investigación aplicada. Es decir, formulación y prueba de hipótesis a problemas de investigación que surgen de la constante necesidad de crear nuevas funcionalidades y optimizar el funcionamiento de los servicios que Yahoo pone a disposición de sus más de 700 millones de usuarios en todo el mundo.

Una característica relevante del tipo de investigación realizada es que, para lograr soluciones de utilidad práctica, esta debe considerar el comportamiento y las preferencias de los usuarios de Yahoo, lo que obliga a contar con acceso a fuentes de datos de la interacción de personas reales e infraestructura de procesamiento para grandes volúmenes de datos. Gracias a la relación con Yahoo Labs en Estados Unidos varias de las soluciones propuestas por el laboratorio de Chile se han transformado en proyectos de ingeniería destinados a servicios en producción.

Como subproductos del trabajo realizado en la investigación aplicada para Yahoo, se han obtenido más de 70 publicaciones indexadas en Scopus y 25 en ISI. La gran mayoría tiene como coautores a estudiantes de doctorado y magíster de las principales universidades nacionales. Estos trabajos también dieron origen a la presentación de 8 patentes en Estados Unidos, todas ellas de propiedad industrial de Yahoo.

Algunos de estos resultados tuvieron difusión internacional acerca del impacto de la ciencia de la computación en la sociedad, con menciones en medios tan importantes como The Wall Street Journal y Scientific American. Es el caso del análisis de datos de Twitter durante el terremoto del 2010, en el que se demuestra que las informaciones verídicas se transmiten ampliamente, mientras que las falsas son desmentidas con rapidez por las mismas personas que usan esta red social de *microblogging*, que es la más extendida en el mundo. También tuvo difusión a nivel nacional un sistema de análisis en tiempo real de mensajes Twitter para predecir tendencias en las elecciones presidenciales.

Para los estudiantes de posgrado y pregrado, el laboratorio proporciona recursos destinados a investigación aplicada que de otra manera serían imposibles de obtener en universidades tanto en Chile como en el extranjero. Dichos recursos están compuestos por el acceso a diversas bases de datos para investigación, las que contienen datos generados

por usuarios reales de los distintos productos de Yahoo, el contacto con investigadores de Yahoo Labs, y la posibilidad de usar computadores de alto rendimiento para procesar dichos datos y probar las aplicaciones en un ambiente similar al obtenido en producción con usuarios reales. Esto ha permitido la titulación de más de 40 estudiantes de ingeniería en computación e informática de universidades nacionales.

El laboratorio recibió apoyo financiero de parte del programa de atracción de inversiones de alta tecnología de Corfo y de los programas de inserción de doctores y tesis de doctorado del sector productivo de Conicyt. Estos fondos tuvieron como objetivo principal la contratación en el laboratorio de investigadores con doctorados recientes y de quienes realizan posdoctorados durante dos o tres años en Chile. En la mayoría de los casos se trata de jóvenes beneficiados con el programa de Becas Chile para doctorados en Chile y en el extranjero.

Varios de estos investigadores jóvenes han sido posteriormente contratados como académicos en universidades nacionales, lo cual permite que continúen ligados al laboratorio mediante un esquema de proyectos de colaboración que incluye financiamiento para estudiantes, presentación de trabajos en congresos internacionales y asistencia a reuniones semestrales de Yahoo Labs en California ("Science Week"), donde se tiene la oportunidad de adquirir de primera fuente una visión global respecto del estado del arte en la disciplina.

Este esquema ha resultado ser exitoso puesto que ha permitido conservar a un gran número de investigadores y estudiantes relacionados con las temáticas de investigación abordadas en el laboratorio, y establecer y mantener un capital humano avanzado en Chile en el área de desarrollo de tecnologías para la Web, lo que beneficia no solo a Yahoo Labs en Chile, sino también a las propias universidades y empresas nacionales que utilizan la Web para prestar servicios a sus clientes.

El beneficio para las universidades proviene de la formación interna de equipos expertos en investigación aplicada y conocimiento real del proceso que va desde la idea hasta el producto final, lo que les permite aumentar su participación en fondos públicos de I+D y transferir a sus estudiantes conceptos de innovación cimentados en la ciencia, esto último entendido como productos de software basados en tecnologías Web y adoptados por muchos usuarios, de modo que dicho proceso está fuertemente relacionado con la solución a problemas de investigación necesarios para lograr productos exitosos.

La formación de profesionales e investigadores por la vía de trabajos de tesis en temas relevantes para Yahoo también tiene beneficios para las empresas nacionales, y esto es cada vez más evidente dada la ubicuidad y transversalidad creciente de productos de software basados en la Web y redes sociales. Estos productos, cuando son exitosos, se caracterizan por tener un alto potencial de crecimiento exponencial en cantidad de usuarios y volumen de datos gestionados en tiempo real.

Típicamente, el ciclo de vida respecto de la innovación en estos productos de software consiste en que una primera versión del producto se construye utilizando software existente de dominio público y se pone en producción en servidores de proveedores de servicios de computación en la nube (*cloud computing*). Esta es una estrategia razonable, puesto que en las primeras etapas de desarrollo e inserción en el mercado lo relevante es definir bien el concepto detrás del producto y su estrategia de monetización. El caso típico son los emprendimientos que apoya el programa Start-Up Chile de Corfo.

Sin embargo, cuando dichos productos son ampliamente adoptados por grandes comunidades de usuarios, surgen problemas de escalabilidad en el software que afectan la experiencia de sus usuarios, tanto respecto de la calidad de los resultados como del tiempo de respuesta. Si el software no es capaz de seguir el crecimiento exponencial de usuarios y volumen de datos, las posibilidades de fracaso son muy altas. Precisamente, estos tipos de problemas son los que se abordan en la investigación que se efectúa en Yahoo Labs en Chile y, por lo tanto, la formación de capital humano avanzado que realiza el laboratorio tiene relevancia para las empresas nacionales.

En las siguientes secciones de este capítulo se describen dos casos de estudio que ilustran el proceso de innovación llevado a cabo en el laboratorio. El primero tiene relación con un proyecto de I+D de impacto interno en Yahoo vinculado con optimizaciones a motores de búsqueda de publicidad. El segundo, con el desarrollo de un proyecto Fondef que fue posible gracias a la formación de capacidades de investigación al interior del laboratorio y su posterior difusión en las universidades participantes. En ambos casos se describe la solución encontrada para organizar equipos de I+D que posibiliten la realización de innovación basada en investigación aplicada.

CASO DE ESTUDIO 1: Optimización de motores de búsqueda vertical

Los motores de búsqueda vertical son sistemas altamente optimizados para responder cientos de miles de consultas por segundo bajo un contexto bien específico, como generar la publicidad digital asociada a una búsqueda o al contenido de una página web. Por lo tanto, sus algoritmos y estructuras de datos son diseñados de acuerdo a requerimientos dictados por el tipo de trabajo que deben realizar. Para el caso de la publicidad se utilizan estructuras de datos diseñadas para recuperar textos pequeños que contienen los avisos publicitarios que mejor calzan con las consultas que llegan al buscador, los cuales deben ser desplegados junto con la respuesta a dichas consultas. Estas tienen la forma de un conjunto de palabras que en el caso de la publicidad tienden a ser numerosas.

La restricción para el tiempo máximo de respuesta para cada consulta es del orden de unas pocas decenas de milisegundos. Esta exigencia no es un tema menor si se considera que cada vez que un usuario del correo de Yahoo selecciona leer un correo, gran parte del texto se envía primero al motor de búsqueda de publicidad para recuperar avisos publicitarios pertinentes al texto y luego se construye la página HTML que es presentada al usuario como respuesta a su petición de lectura del texto del correo, todo lo cual debe ocurrir en una fracción de segundo.

Si se considera que los productos de Yahoo interactúan en todo momento con millones de usuarios, la eficiencia de las soluciones propuestas es un requerimiento de gran importancia. La solución es desplegar el motor de búsqueda en centros de datos con cientos de computadores, cada uno con muchos procesadores, los cuales están dedicados exclusivamente a ejecutar las computaciones asociadas a la solución de las consultas. Para acelerar este proceso se utilizan estructuras de datos distribuidas, llamadas índices invertidos, en los procesadores del centro de datos.

Los índices invertidos están compuestos de listas de documentos en las que, en nuestro caso, cada uno de ellos es un aviso publicitario. Se tienen tantas listas como palabras relevantes existan en la colección de documentos (ver Figura 1). Por lo tanto, el primer paso para resolver una consulta es recuperar la lista de documentos que contengan las palabras que forman la consulta. Luego de esto se aplica un algoritmo para ordenarlos de acuerdo a una métrica de relevancia y se seleccionan aquellos de mayor puntaje como respuesta a la consulta.

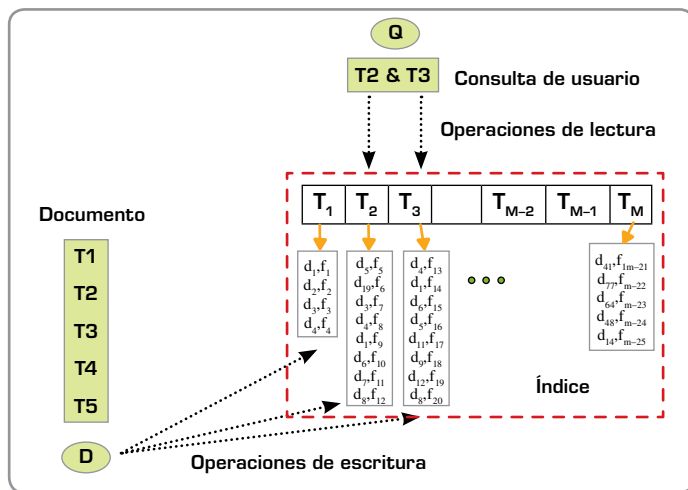


Figura 1. Índice invertido y su relación con la solución de consultas de usuarios y la inserción de nuevos documentos. Para calcular las respuestas a las consultas es necesario leer las listas invertidas de los términos que componen cada consulta. Para insertar un nuevo documento, es necesario actualizar (escribir) las listas invertidas de los términos contenidos en él.

El objetivo de este proyecto fue estudiar optimizaciones a diversos aspectos relacionados con la implementación, despliegue y operación del motor de búsqueda vertical. Se destinaron dos equipos de trabajo al proyecto que estaban constituidos por personas que ya venían trabajando en investigación con anterioridad en el laboratorio de Yahoo, de manera que el problema de la afinidad entre personas y conocimiento profundo de las potencialidades de cada uno ya estaba resuelto de antemano al proyecto.

Como es sabido, cada equipo debe tener un propósito que motive y dé sentido al esfuerzo que debe realizar. Ciertamente que trabajar en torno a un sistema real de gran escala, proporcionado por una empresa de la importancia de Yahoo para la disciplina, presenta desafíos y oportunidades de crecimiento profesional que justifican el esfuerzo. No obstante, en equipos compuestos por universitarios con vocación por la investigación lo anterior no necesariamente representa en sí mismo una motivación que satisfaga de forma completa los intereses personales.

Es decir, los tópicos abordados en el proyecto debían ser lo suficientemente genéricos como para constituirse en una fuente de progreso en la carrera académica que permitiera la generación de publicaciones desarrolladas en torno a líneas de investigación amplias, las cuales debían dar cabida a intereses adicionales, tales como la formación de investigadores a nivel de doctorado, sin entrar en conflicto, por ejemplo, con temas de derechos de propiedad industrial.

En este contexto, el *big picture* que mueve a la comunidad científica del área es que actualmente los centros de datos consumen del orden del 2 % al 5 % de la energía eléctrica mundial. Las estimaciones no son precisas, pero algunos especialistas mencionan que el año 2012 se requerían 30 centrales nucleares para generar la energía eléctrica necesaria destinada a alimentar los centros de datos del mundo. En particular, dado el volumen de recursos utilizados y el alto tráfico de requerimientos de usuarios que deben atender, los centros de datos que alojan los distintos tipos de motores de búsqueda para la Web son responsables de una fracción importante de ese consumo de energía.

Una de las contribuciones del laboratorio en Chile ha sido mostrar que con algoritmos eficientes de procesamiento de consultas es posible reducir la cantidad de recursos de hardware requeridos para atender una determinada carga de trabajo, y por lo tanto, al disminuir la redundancia de recursos, es posible reducir la cantidad de energía consumida. Esto es importante pues el mayor consumidor de energía eléctrica en un centro de datos es el aire acondicionado y este consumo es proporcional al número de computadores en el mismo.

El proyecto consistió en (1) desarrollar algoritmos de compresión de índices para permitir almacenar mayor cantidad de datos y realizar procesamiento eficiente de consultas en cada procesador, y (2) desarrollar estrategias de asignación de recursos que permitan determinar con pre-

cisión la cantidad de procesadores requeridos para atender una determinada carga de trabajo o tráfico de consultas. Cada parte fue abordada por un equipo distinto compuesto de ingenieros e investigadores contratados por el laboratorio, y la participación de tesis de doctorado y magíster, donde los investigadores realizan la cosupervisión de las tesis en conjunto con los profesores de las respectivas universidades, en este caso la Universidad de Chile, la Universidad de Santiago de Chile y la Universidad Técnica Federico Santa María.

SUBPROYECTO 1: Compresión de índices invertidos

Una reducción del consumo de memoria del índice invertido puede conducir a una reducción de la cantidad total de procesadores requeridos para dar servicio al tráfico de consultas. No obstante, el tiempo de respuesta de cada consulta no puede degradarse al punto de superar la restricción dada por el tiempo máximo de respuesta. Descomprimir una lista de documentos para luego aplicar un método de *ranking* sobre esos documentos es un proceso más costoso en tiempo de ejecución que trabajar sobre la lista original.

Una vez construidas a partir de la colección de documentos, las listas invertidas contienen secuencias de números enteros que se utilizan para identificar cada documento. La solución propuesta parte de la observación de que en las listas invertidas ocurren secuencias largas de identificadores de documentos cuyos valores difieren en una unidad. Por lo tanto, dichas secuencias pueden ser sustituidas por una representación comprimida del total de identificadores en cada secuencia, lo cual conduce a un ahorro de espacio, puesto que ya no es necesario almacenar los valores de cada uno de los identificadores porque se pueden calcular durante el proceso de *ranking* de documentos. Este simple mecanismo permitió superar por un amplio margen el método de compresión de listas invertidas que se utilizaba en el motor de búsqueda hasta ese momento.

Por supuesto que esta descripción es una sobresimplificación del proceso de I+D que fue necesario realizar, ya que se consideraron varios otros aspectos que van desde la implementación eficiente de los algoritmos hasta su integración y funcionamiento correcto en la arquitectura de software del motor de búsqueda. Respecto de la investigación, se debió estudiar la adaptación de métodos de compresión existentes para considerar las secuencias de identificadores similares y diseñar heurísticas para agrupar documentos relacionados, de modo de aumentar la probabilidad de que dichas secuencias tengan un largo mayor y ganar de esta manera en compresión.

Posteriormente, el esquema de compresión fue extendido para permitir almacenar junto con los identificadores de documentos las posiciones donde la palabra asociada a la lista invertida aparece dentro del documento. Esto permitió extender las funcionalidades del motor de bús-

queda con métodos de *ranking* de documentos que otorguen un mayor puntaje a los documentos que contienen las palabras de búsqueda más cercanas unas con otros dentro del documento. Antes de este trabajo no era posible aplicar ese tipo de *ranking* sobre los documentos indexados por el motor de búsqueda.

Como líneas de investigación para tesis y investigadores surgidas a partir de este trabajo, podemos mencionar las siguientes:

- [Tesis de magíster] Hasta ahora, el motor de búsqueda ha sido sólo visto como un conjunto de procesadores que mantienen un índice invertido para resolver consultas. Si pensamos en incluir *rankings* de documentos que consideren las posiciones de las palabras de búsqueda dentro de los documentos, entonces, ¿por qué no considerar también los documentos como parte del proceso de solución de consultas? En particular, un trabajo de tesis de magíster [M1] ha sido dedicado a mostrar que en varios casos no es necesario almacenar explícitamente las posiciones de las palabras en los documentos, sino que es suficiente con almacenar cada documento debidamente comprimido y calcular las posiciones solo para un subconjunto de los documentos con mayor probabilidad de estar dentro de los de mejor puntaje mediante la descompresión de estos para encontrar las posiciones. Resulta que para motores de publicidad esta es la mejor opción, puesto que se trata de consultas con gran número de términos y documentos pequeños. Estos resultados dieron lugar a dos publicaciones en la mejor conferencia del área [SIGIR 2012] [SIGIR 2013].
- [Tesis de doctorado] Una tesis doctoral [D4] derivada de este proyecto plantea un cambio radical de enfoque. En lugar de mirar el proceso de *ranking* y despliegue de resultados como dos tareas independientes, es decir, índice invertido y luego recuperación de los documentos seleccionados, la tesis plantea utilizar estructuras de datos llamados Wavelet Trees (WT) para representar textos comprimidos autoindexados. Los WT no han sido aplicados al contexto de motores de búsqueda, pero se anticipa que permiten tratar todos los documentos asignados a un procesador como un solo documento comprimido sobre el cual es posible realizar búsquedas eficientes. La ventaja está en que permiten realizar *rankings* de documentos basados en las posiciones de las palabras en cada uno de estos últimos. La hipótesis es que los WT, al concentrar en un mismo espacio de memoria tanto el texto como el índice de búsqueda, representan una alternativa más eficiente respecto de la cantidad total de procesadores requeridos para servir una determinada carga de trabajo. Esta línea de trabajo ha dado lugar a una publicación de conferencia [SPIRE 2010] y otra en una revista del área [IPM 2012].
- [Tesis de doctorado] El método de *ranking* de documentos utilizado por el motor de búsqueda se ha constituido en un estándar de la industria. Si cada uno de los procesadores involucrados en la solución

de una consulta ejecuta el mismo método de *ranking*, entonces una pregunta interesante surge cuando uno considera que no es necesario pedir a todos los procesadores la misma cantidad de respuestas, como ocurre actualmente. Por ejemplo, si la consulta se envía a 100 procesadores y solo estamos interesados en los 10 mejores resultados, entonces a lo más 10 procesadores serán capaces de aportar resultados dentro de los 10 mejores. Enviar la consulta a 100 procesadores y solicitar a cada uno 10 resultados es ciertamente un desperdicio de uso de recursos de cómputo con el respectivo consumo de energía innecesario; el problema es encontrar una heurística que permita predecir con cierta probabilidad de éxito cuántos resultados solicitar a cada procesador. Un primer resultado en esta línea ha sido publicado en [Euro-Par 2013] y es parte de una tesis doctoral [D6]. Las listas invertidas almacenan las frecuencias con que cada palabra aparece referenciada en cada documento. La propuesta de esta tesis consiste en representar la distribución de estas frecuencias con series de Fourier, de manera de utilizar los coeficientes de la serie para clasificar las listas invertidas distribuidas en los procesadores. Una aplicación de esta idea consiste en utilizar los coeficientes para determinar el número de resultados que es necesario solicitar a cada procesador durante el procesamiento de una consulta.

- [Tesis de magíster] Los procesadores sobre los cuales es desplegado el motor de búsqueda habitualmente poseen muchos procesadores que permiten la ejecución eficiente de muchas hebras (*threads*) de ejecución. Estas hebras pueden ser utilizadas para aumentar el nivel de concurrencia en el procesamiento de consultas. Aquí surge un problema de planificación de tareas donde dos o más hebras pueden ser destinadas a acelerar el procesamiento de consultas y reducir de esta manera el tiempo de procesamiento de cada una. Esto requiere del diseño de una estrategia de asignación dinámica de hebras a base de una predicción del tiempo de ejecución de la consulta. Esta predicción debe ser realizada en línea, a medida que se reciben las consultas en el procesador, para lo cual se exploran métodos basados en aprendizaje de máquina. Este trabajo es parte de una tesis de magíster [M4] y surge de publicaciones anteriores de los investigadores del proyecto [CIKM 2010] [Euro-Par 2008].

Dos de los tesisistas participaron desde el comienzo en el proyecto actuando como ingenieros de apoyo y recopilación del estado del arte en métodos de compresión de índices invertidos, lo que les permitió adquirir conocimiento de primera línea en el área de trabajo de sus respectivas tesis. En general, los trabajos de tesis mencionados dan cuenta de las líneas de investigación derivadas del proyecto que se desarrollan actualmente en el laboratorio de Yahoo.

SUBPROYECTO 2: Planeación de capacidad de motores de búsqueda

Otro problema de uso eficiente de los recursos computacionales desplegados en el centro de datos tiene que ver con la determinación de cuántos recursos son realmente necesarios para una determinada carga de trabajo, y cuál es la cantidad requerida para una cierta predicción del tráfico de consultas en el mediano plazo.

La arquitectura del motor de búsqueda estudiado en el proyecto está formada por un conjunto de servicios. Los servicios principales son tres: (1) "Front-Service", el cual es un conjunto de procesadores encargado de recepcionar las consultas, enviarlas a los otros dos servicios para obtener la solución y remitir la respuesta al usuario; (2) "Caching-Service", el cual contiene respuestas calculadas anteriormente para las consultas más frecuentes, y (3) "Index-Service", el cual contiene el índice invertido para calcular la respuesta a la consulta si esta no es encontrada en el "Caching-Service". La Figura 2 muestra un esquema general de la arquitectura.

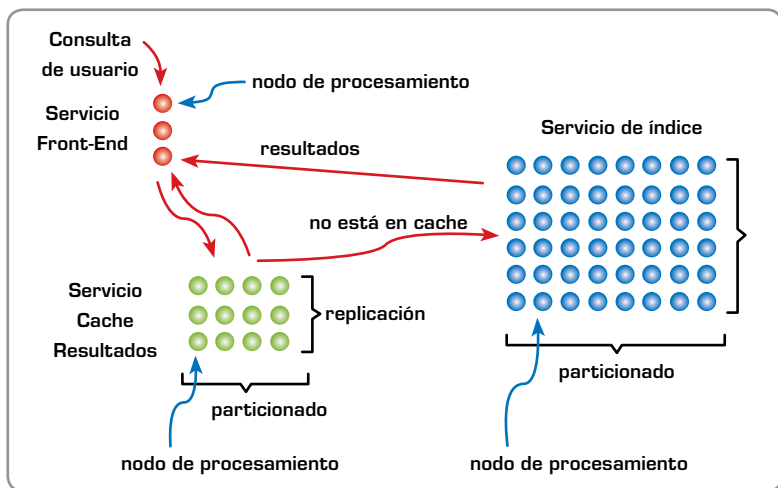


Figura 2. Componentes principales del motor de búsqueda de publicidad. Cada círculo indica un procesador y las flechas indican el camino seguido por las consultas de los usuarios del motor de búsqueda. Las consultas llegan a uno de los procesadores del "Front Service", luego se envían a los procesadores del "Results Cache Service", y si la respuesta no es encontrada en el cache, la consulta se envía a los procesadores del "Index Service".

Cada servicio es particionado en un conjunto de procesadores y el contenido de cada procesador es replicado en procesadores adicionales para mejorar el rendimiento y para tolerar fallas de procesadores. Por lo tanto, poder dimensionar adecuadamente la cantidad total de procesadores requeridos para procesar las consultas sin llegar a sobredimensionar excesivamente los recursos desplegados en el centro de datos es un

tema relevante desde el punto de vista de la operación económica del motor de búsqueda.

El problema planteado es del tipo de búsqueda del óptimo en un espacio combinatorial donde cada punto del espacio está dado por una cantidad específica de particiones y réplicas para cada servicio. El desafío consistió en modelar un sistema complejo, como el motor de búsqueda, para poder determinar la configuración óptima de los servicios.

La solución encontrada consistió en tres pasos. Primero se formuló un modelo del sistema basado en teoría de colas con sus respectivas fórmulas de rendimiento, suponiendo que las consultas circulan unas de otras por la red en forma independiente. Esta simplificación permite reducir significativamente el espacio de búsqueda a un 5 % de configuraciones posibles de contener el óptimo. Para las configuraciones restantes se recurre a una simulación discreta del rendimiento del motor de búsqueda. Para esto se creó una metodología de modelación y simulación basada en una serie de programas de *benchmark* diseñados para medir el costo de las operaciones relevantes en cada servicio.

Además, el hardware fue representado utilizando modelos de computación paralela diseñados para recrear las características relevantes del costo de computación y comunicación del proceso de solución de múltiples consultas concurrentes en el motor de búsqueda. También se contempla el uso de redes de Petri para facilitar la especificación y verificación del modelo de simulación. Una vez encontrado el óptimo mediante simulación, como último paso se aplica una heurística de particionamiento de un grafo en un conjunto de grupos de procesadores. En este caso, los nodos del grafo representan procesadores y los arcos entre pares de nodos indican el volumen de comunicación entre procesadores.

El método propuesto representa una innovación en el estado del arte, puesto que no se conocen métodos efectivos de planeación de capacidad para motores de búsqueda. La bibliografía solo reporta métodos teóricos y poco realistas para la complejidad de un sistema como el abordado en el proyecto. La clave está en formular modelos de simulación lo suficientemente precisos para obtener resultados cercanos a la realidad, pero a la vez lo suficientemente livianos para permitir ejecuciones del respectivo programa de simulación en tiempos tolerables para los administradores del centro de datos. El nivel de detalle del modelamiento del costo de las computaciones y el costo del hardware tienen un impacto directo en el tiempo de ejecución de los programas de simulación.

Al igual que en el subproyecto 1, el equipo de trabajo estuvo apoyado por tesis de magíster y doctorado como las siguientes:

- [Tesis de magíster] Parte del trabajo realizado fue abordado mediante una tesis de magíster [M3] destinada a estudiar la utilización de redes de Petri (*timed colored Petri nets*) como método formal para modelar el costo del procesamiento de consultas en el motor de búsqueda y verificar modelos. La tesis fue finalizada durante el transcurso del

proyecto, y dio lugar a una publicación en una conferencia [ICATPN 2012] y posteriormente una versión extendida fue aceptada en una revista [FINF 2013]. El tesista actualmente está cursando un doctorado bajo la supervisión el mismo equipo del proyecto.

- [Tesis de doctorado] Adicionalmente, un tesista de doctorado [D5] está estudiando extensiones a la metodología de planeación de capacidad mediante la incorporación de un formalismo de modelación y simulación de gran poder de expresividad para sistemas de mayor complejidad. Para esto, el estudiante realizó una estadía de 4 meses con un grupo especializado en este tema en la Universidad de Carleton en Canadá. También realizó mejoras a la predicción del costo de comunicación entre procesadores, lo cual fue publicado en [PDP 2013]. Por otra parte, para que la metodología de planeación de capacidad de motores de búsqueda sea de utilidad práctica en un centro de datos, es relevante reducir los tiempos de ejecución del conjunto de simulaciones requeridas para encontrar el número óptimo de procesadores y determinar el mapa de despliegue de servicios en estos procesadores. Los tiempos de ejecución de estos simuladores superan la media hora y, por lo tanto, el tesista tuvo la tarea de evaluar distintas estrategias de paralelización de estos simuladores con el objetivo de ejecutarlos sobre varios procesadores y reducir de esta manera el tiempo de ejecución de cada simulación. La paralelización involucra la solución a un problema complejo de sincronización de eventos de simulación que ocurren en paralelo en distintos procesadores, para el cual se han propuesto varios protocolos de sincronización de eventos. La metodología de modelación y simulación debe ser extendida para incluir el protocolo de sincronización de eventos de mejor rendimiento.
- [Posdoctorando] El proyecto también contó con la participación de un investigador joven que ingresó al laboratorio a realizar un posdoctorado. Su trabajo consistió en validar experimentalmente una hipótesis que el equipo de trabajo había planteado como solución al problema de la paralelización de las simulaciones. Esta consistió en adoptar un enfoque de sincronización aproximada de eventos paralelos, donde la calidad de la aproximación es controlada mediante un método de ajuste automático del avance en el tiempo de simulación en cada procesador. Este método fue desarrollado por el equipo del proyecto y la hipótesis era que esta estrategia de simulación paralela aproximada iba a permitir la obtención rápida de resultados aproximados muy similares a los de la simulación secuencial o paralela exacta del mismo sistema. Es decir, resultados con una precisión de sobre el 95 % con tiempos de ejecución mucho menores que la simulación paralela exacta. El estudio experimental realizado por el posdoctorando permitió validar esta hipótesis y los resultados fueron publicados en [PADS 2013].

Los trabajos previos que sirvieron de base para formar un equipo especializado en este tema tienen relación con una tesis doctoral [D1] y proyectos iniciales que derivaron en publicaciones donde, para validar hipótesis, era necesario formular modelos de predicción del rendimiento de motores de búsqueda para la Web [Euro-Par 2011] [HPDC 2010] [PARCO 2010] [ECIR 2010].

CASO DE ESTUDIO 2: Proyecto Fondef “Observatorios de la Web en tiempo real”

Las capacidades formadas en recursos humanos y colaboración en investigación al interior del laboratorio permitieron la formulación y adjudicación de un proyecto Fondef (D09I1185) relacionado con la construcción de tecnología escalable para observar tendencias en la Web y redes sociales en tiempo real. Fue necesario identificar y establecer alianzas con empresas nacionales de base tecnológica que tuvieran experiencia en el mercado para este tipo de tecnología. Se contó con el patrocinio de la Universidad de Chile, la Universidad de Santiago y la Universidad de Concepción.

La innovación principal introducida en el proyecto tiene relación con la recolección e indexación en el espacio y tiempo de objetos en tiempo real, y aplicar sobre estos objetos un conjunto de operadores espacio-temporales. A partir de esto se propone construir productos de software con mayor valor que los disponibles en el mercado. En este contexto, el concepto de “objeto” es genérico, pudiendo representar a personas o entidades mencionadas en la Web y redes sociales, y el espacio puede ser geográfico o virtual. Por ejemplo, una aplicación de esta idea puede ser la situación representada en la Figura 3, donde el espacio está constituido por medios de prensa agrupados por afinidad editorial, los objetos representan personas, y los operadores además de responder a consultas como la descrita en la figura pueden incluir cosas adicionales, tales como el análisis de los textos que referencian al objeto (discurso positivo, negativo o neutral), y con los cuales otros objetos similares al analizado han tenido coocurrencia en el tiempo y el espacio.

En general, el proyecto plantea la construcción de los siguientes componentes: (1) Clasificador de documentos, (2) detector de tópicos emergentes, (3) detector de comunidades emergentes, (4) analizador de opiniones, (5) detector de sentimientos, (6) etiquetador social colaborativo, (7) seguidor de series de tiempo, (8) identificador de entidades, (9) operadores espacio-temporales, y (10) recolector, indexador y buscador espacio-temporal.

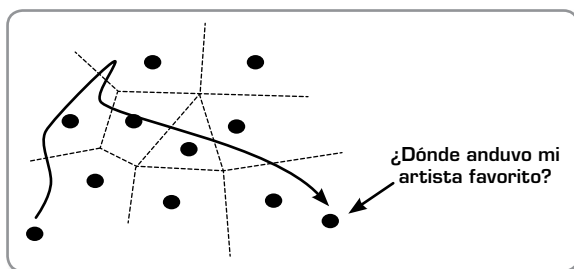


Figura 3. Seguimiento a entidades (personas) distribuidas en el espacio (medios de prensa) a lo largo del tiempo.

La estrategia de investigación y desarrollo aplicada se describe a continuación. Para facilitar la independencia del trabajo de los equipos de I+D, se establecieron subproyectos con cada una de las cuatro empresas participantes en el proyecto. Al igual que en el caso de estudio anterior, en cada subproyecto se formaron equipos integrados por investigadores, ingenieros de software y estudiantes tesistas de magíster y doctorado [D2] [D3] [D7] [D8] [M2]. La diferencia está en la interacción con cada empresa socia del proyecto. A cada empresa la ubicamos entre el equipo de I+D y los clientes de la tecnología desarrollada, donde es la propia empresa la que posee una relación de confianza con un cliente determinado, el cual es utilizado para probar el prototipo desarrollado y estudiar el mercado para el producto. La Figura 4 describe el proceso iterativo empleado en cada subproyecto (Plug-In). El proceso es conducido por el emprendedor detrás de la empresa, quien es el primer interesado en llevar pronto los resultados al mercado.

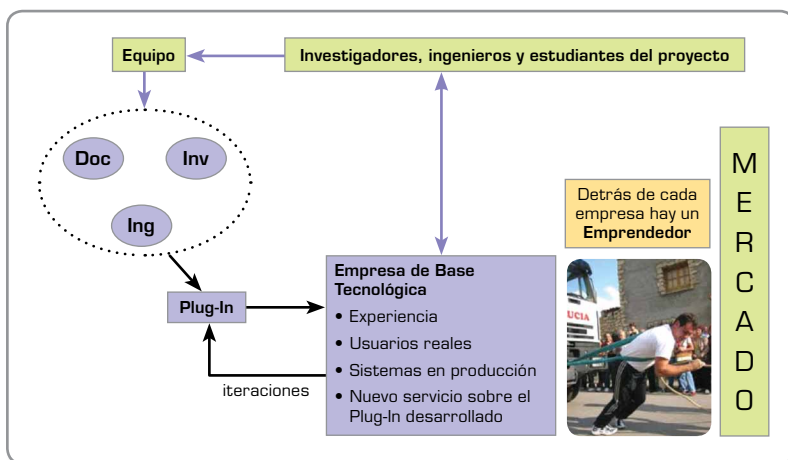


Figura 4. Estrategia para la colaboración entre un grupo de investigación y una empresa de base tecnológica.

Otro aspecto importante del proyecto fue su organización en los llamados Plug-Ins (componentes), cada uno asociado a un subproyecto de I+D con equipos distintos, los cuales son construidos sobre una arquitectura de software común tal que sea posible su integración para construir distintos productos que permitan observar la Web en tiempo real. De esta manera, los equipos de I+D pueden trabajar en paralelo en cada subproyecto, pero los resultados finales pueden ser integrados en distintos productos o ser utilizados de modo independiente. La Figura 5 presenta una vista general de los productos del proyecto y la estrategia de monetización de los Plug-Ins desarrollados.

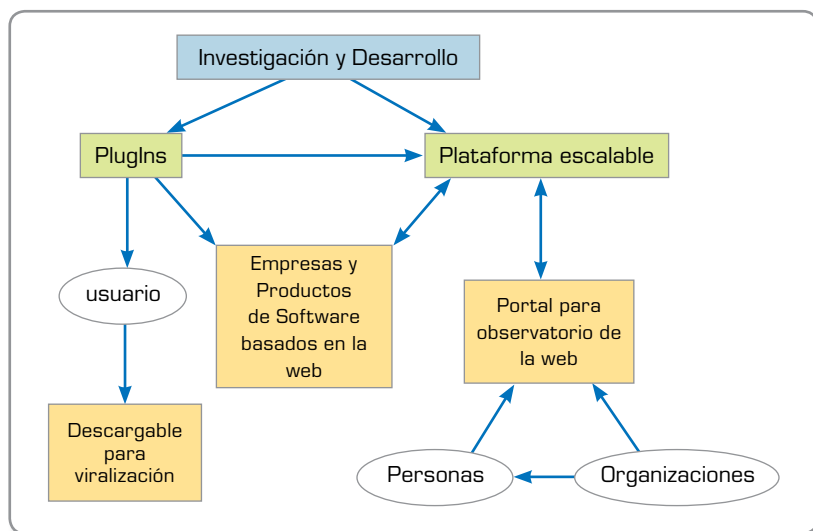


Figura 5. Organización de productos para la estrategia de monetización del proyecto Fondef.

Uno de estos subproyectos dio lugar a un emprendimiento en Silicon Valley por parte de los socios de la empresa. Se construyó un producto de software para el seguimiento y gestión de los contactos que sus usuarios mantienen en diversas plataformas sociales y correo. El objetivo de la empresa es utilizar el sistema desarrollado para crear una plataforma de comercio electrónico basado en recomendaciones realizadas por personas conocidas (contactos) de los usuarios. El sistema desarrollado por el proyecto Fondef representa la tecnología base sobre la cual está construido el producto. Se trata de un motor de gestión de contactos que permite mantener relaciones de afinidades en espacio y tiempo entre usuarios, y permite unificar contactos provenientes de distintas fuentes. Por ejemplo, una persona determinada podría estar representada con distinta información en redes sociales diferentes. La extensión del producto para gestionar proveedores de servicios ha sido apoyada por inversionistas de capital de riesgo y por el programa de innovación empresarial de Corfo.

Otro producto de software originado a partir de uno de los Plug-Ins desarrollados en el proyecto Fondef tiene que ver con un producto para el análisis de correos electrónicos que una de las empresas socias del proyecto estuvo dispuesta a impulsar en el sector de servicios bancarios. La motivación detrás del producto es la siguiente: Se sabe que el correo electrónico es un medio ubicuo de comunicación entre personas en una amplia variedad de tipos de empresas y organizaciones. Diariamente, las personas deben enviar y responder decenas (si no cientos) de correos electrónicos a clientes, subordinados, pares y superiores dentro de la estructura jerárquica de cada organización en la empresa o entre organizaciones dentro de la misma empresa o entre empresas. En este contexto, al cabo de un día laboral, semana, mes o incluso año de intercambio intensivo de correos electrónicos con distintas personas, a muchos usuarios les debería ser atractivo contar con una herramienta de software que les permita analizar el texto de sus correos electrónicos y entregar como resultado distintos perfiles de la comunicación sostenida con los destinatarios.

Este subproyecto fue posteriormente apoyado por financiamiento de Innova Corfo L2, donde la propuesta es mejorar la calidad de los perfiles de correos mediante la incorporación de la cultura y jerga del país. Un objetivo importante de este segundo proyecto I+D es lograr una metodología que permita generar versiones del producto que sean pertinentes a la cultura y jerga de otros países de la región iberoamericana, y ampliar de esta manera el mercado para el producto.

La realización del proyecto Fondef también se diferencia del caso de estudio anterior, en que el nivel de riesgo es mucho mayor. Al comienzo del proyecto las ideas para posibles productos estaban muy poco definidas y a lo largo de su desarrollo fueron las empresas socias las que dictaron los requerimientos. El proyecto también contó con una participación mucho mayor de tesis de las universidades participantes. Esto, si bien tiene la ventaja de que permite abordar los temas más indefinidos y de mayor riesgo al inicio del proyecto, tiene el problema de los derechos de propiedad industrial, para el cual cada institución presentaba distintas soluciones. Por otra parte, algunas de las soluciones desarrolladas por los tesis no encontraron aplicación inmediata en los productos principales del proyecto, puesto que en varios casos la evolución del producto siguió los intereses de la empresa asociada al producto, los cuales no necesariamente calzaron con los intereses del profesor guía de tesis y del estudiante.

Se optó por crear un observatorio de acceso público como una plataforma para probar las distintas soluciones encontradas por los tesis para implementar los Plug-Ins del proyecto, y darle de esta manera mayor visibilidad nacional al proyecto y a sus resultados. Esta plataforma adoptó la forma de un "Observatorio Político" dedicado a observar la mensajería de Twitter y mostrar tendencias en las elecciones primarias

y presidenciales del 2013. Actualmente, este sistema está funcionando a modo de prototipo y se están incluyendo en él varias de las soluciones de tesis respecto de operadores avanzados, tales como detección de usuarios líderes de opinión, comunidades emergentes, detectores de tópicos emergentes, etc.

Por otra parte, con el fin de resolver las limitaciones de las instituciones participantes respecto de participación en empresas destinadas a comercializar productos de software, se optó por un modelo de negocios de monetización de la tecnología basada en licenciamiento y un modelo de escalabilidad del negocio basado en sublicencias para empresas con influencia en otros mercados geográficos. La Figura 6 presenta una vista general del modelo de negocios.

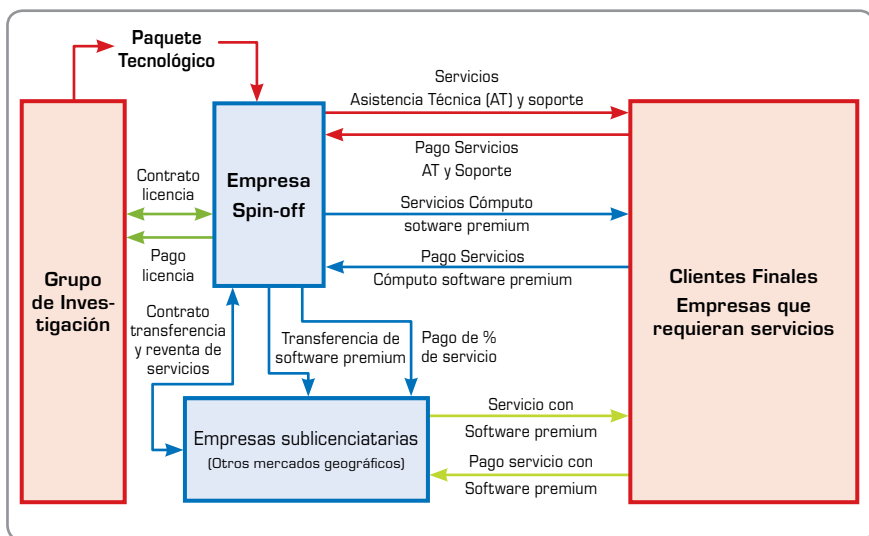


Figura 6. Modelo de negocios para la tecnología generada en cada producto del proyecto Fondef.

Conclusiones

En los dos casos de estudio sobre la experiencia de Yahoo Labs en Chile se puede observar que es posible realizar investigación aplicada conducente a lograr un impacto en la industria y a realizar actividades académicas de formación y publicaciones científicas. Sin bien en varios aspectos la experiencia Yahoo Labs en Chile ha sido exitosa, también existen aspectos que es posible mejorar respecto a la relación con el medio nacional.

Nuestra experiencia indica que en las universidades se tiende a confundir investigación en aplicaciones de ciencia de la computación con investigación aplicada. La primera es una actividad de corte más académico, habitualmente bien valorada en Fondecyt porque genera numerosas publicaciones en revistas indexadas por el ISI Web of Science, mientras

que la segunda es una actividad fuertemente ligada a un proceso real, el cual va dictando continuamente los requerimientos de las soluciones y va planteando nuevos desafíos en investigación. La presencia de Yahoo Labs en Chile es un aporte en esta segunda línea, y nuestra impresión es que este tipo de investigación no se reconoce adecuadamente. Esto se refleja en la poca valoración que reciben las publicaciones en congresos y patentes de los posdoctorandos que han sido parte de Yahoo en el programa Fondecyt de Iniciación. Esto tiene un impacto negativo en la carrera de los investigadores jóvenes dedicados a realizar investigación aplicada en el área. Sin embargo, hemos visto claramente que estos son capaces de generar valor al país en el ámbito de innovación basada en investigación aplicada.

En particular, en las áreas de investigación abordadas por Yahoo en Chile, la publicación en determinados congresos tiene mayor impacto que en las revistas del área indexadas por el ISI Web of Science. Varios estudios bibliométricos dan cuenta de esta realidad, la cual se ha ido acrecentando en los últimos años, donde se observa que la comunidad del área concentra sus publicaciones principalmente en algunas conferencias de gran impacto.

Otro aspecto relevante tiene que ver con la propiedad industrial de las tesis que realizan los estudiantes en el contexto de proyectos donde están involucradas empresas que exigen la propiedad de todos los derechos. Cada universidad tiene sus propias normas respecto de tesis de estudiantes. La solución que ha encontrado el laboratorio es que en la etapa inicial de los tesisas; estos realizan labores de ingenieros de software y estudian el estado del arte en sus temas específicos, todo lo cual les permite participar productivamente en un equipo de investigación para llegar a conocer en profundidad la problemática abordada. Posteriormente, se separan del equipo y formulan sus propias soluciones como parte de sus proyectos de tesis. Sin embargo, el riesgo de esto es el posible distanciamiento del proceso real y la respectiva propuesta de soluciones de menor utilidad práctica.

Como epílogo, queremos destacar que la labor de un laboratorio de investigación industrial tiene varios roles. Primero, debe avanzar el estado del arte en tecnologías específicas que son relevantes a una empresa para generar beneficios económicos o de calidad de servicio. Segundo, debe transferir las tecnologías relevantes ya existentes a grupos de ingeniería para que resuelvan los problemas que van encontrado. Finalmente, también debe actuar como consultor estratégico en todos los niveles de la empresa, desde el nivel ejecutivo al nivel de ingeniería. En resumen, estos laboratorios deben verse como el puente entre los centros de investigación básicos como las universidades y las unidades empresariales que desarrollan el negocio de una empresa.

Literatura citada

Tesis de posgrado

- [D1] CARLOS GÓMEZ-PANTOJA, tesis de doctorado, Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Chile, 2014.
- [D2] TERESA BRACOMENTE NOLE, tesis de doctorado, Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Chile, 2014.
- [D3] JHESER GUZMÁN, tesis de doctorado, Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Chile, 2014.
- [D4] Mauricio Oyarzún, tesis de doctorado, Departamento de Ingeniería Informática, Universidad de Santiago de Chile, 2014.
- [D5] ALONSO INOSTROSA-PSIJAS, tesis de doctorado, Departamento de Ingeniería Informática, Universidad de Santiago de Chile, 2014.
- [D6] ÓSCAR ROJAS, tesis de doctorado, Departamento de Ingeniería Informática, Universidad de Santiago de Chile, 2014.
- [D7] JUAN ZAMORA, tesis de doctorado, Departamento de Informática, Universidad Federico Santa María, Chile, 2014.
- [D8] DIEGO CARO, tesis de doctorado, Departamento de Ingeniería Informática y Ciencias de la Computación, Universidad de Concepción, Chile, 2014.
- [M1] SENÉN GONZÁLEZ, tesis de magíster, Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Chile, 2013.
- [M2] FELIPE BRAVO, tesis de magíster, Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Chile, 2013.
- [M3] JAIR LOBOS, tesis de magíster, Departamento de Ingeniería Informática, Universidad de Santiago de Chile, 2013.
- [M4] DANILO BUSTOS, tesis de magíster, Departamento de Ingeniería Informática, Universidad de Santiago de Chile, 2014.

Publicaciones indexadas en Scopus

- [SIGIR 2013] DIEGO ARROYUELO, SENÉN GONZÁLEZ, MAURICIO OYARZÚN, VÍCTOR SEPÚLVEDA, "Document identifier reassignment and run-length-compressed inverted indexes for improved search performance", in proceedings of the 36th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR 2013), Dublin, Ireland, 2013.
- [SPIRE 2013] CAROLINA BONACIC and MAURICIO MARÍN, "Simulation Study of Multi-threading in Web Search Engine Processors", in proceedings of the 20th Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2013), Lecture Notes in Computer Science 8214, Oct. 2013.
- [Euro-Par 2013] OSCAR ROJAS, VERÓNICA GIL-COSTA, and MAURICIO MARÍN, "Efficient Parallel Block-Max WAND Algorithm", in proceedings of the 19th International European Conference on Parallel and Distributed Computing (Euro-Par 2013), Aachen, Germany, Lecture Notes in Computer Science 8097, August 2013.

- [PADS 2013] MAURICIO MARÍN, VERÓNICA GIL-COSTA, CAROLINA BONACIC and ROBERTO SOLAR, "Approximate Parallel Simulation of Web Search Engines", in proceedings of the ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation (PADS 2013), Montreal, Canada, May 2013.
- [PDP 2013] VERÓNICA GIL-COSTA, ALONSO INOSTROSA-PSIJAS, MAURICIO MARÍN and ESTEBAN FEUERSTAIN, "Service Deployment Algorithms for Vertical Search Engines", in proceedings of the 21st Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing (PDP 2013), Northern Ireland, Feb. 2013.
- [SIGIR 2012] DIEGO ARROYUELO, TORSTEN SUEL, SENÉN GONZÁLEZ, MAURICIO OYARZÚN and MAURICIO MARÍN, "To Index or Not to Index: Time-Space Trade-offs in Search Engines with Positional Ranking Functions", in proceedings of the 35th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR 2012), Portland, Oregon, US, Aug. 12-16, 2012.
- [ICATPN 2012] VERÓNICA GIL-COSTA, JAIR LOBOS, ALONSO INOSTROSA-PSIJAS and MAURICIO MARÍN, "Capacity Planning for Vertical Search Engines: An approach based on Coloured Petri Nets", in proceedings of the 33rd International Conference on Application and Theory of Petri Nets and Concurrency (ICATPN 2012), Hamburg, Germany, June 25-29, 2012.
- [Euro-Par 2011] CARLOS GÓMEZ-PANTOJA, MAURICIO MARÍN, VERÓNICA GIL-COSTA, and CAROLINA BONACIC, "An Evaluation of Fault-Tolerant Query Processing for Web Search Engines", in proceedings of the 17th International European Conference on Parallel and Distributed Computing (Euro-Par 2011), Bordeaux, France, Lecture Notes in Computer Science 6852, pp. 393-404, Springer, Aug., 2011.
- [CIKM 2010] CAROLINA BONACIC, CARLOS GARCÍA, MAURICIO MARÍN, MANUEL PRIETO-MATIAS and FRANCISCO TIRADO, "Building Efficient Multi-Threaded Search Nodes", in proceedings of the 19th ACM Conference on Information and Knowledge Management (CIKM 2010), Toronto, Canada, Oct 26-30, 2010.
- [HPDC 2010] MAURICIO MARÍN, VERÓNICA GIL-COSTA, CARLOS GÓMEZ-PANTOJA, "New Caching Techniques for Web Search Engines", in proceedings of the 19th ACM International Symposium on High Performance Distributed Computing (HPDC 2010), Chicago, Illinois, June 20-25, 2010.
- [ECIR 2010] MARCELO MENDOZA, MAURICIO MARÍN, FLAVIO FERRAROTTI, BÁRBARA POBLETE, "Learning to Distribute Queries onto Web Search Nodes", in proceedings of the 32nd European Conference on Information Retrieval (ECIR 2010), Milton Keynes, UK, March. 2010, Lecture Notes in Computer Science 5993, pp. 281-292, Springer.
- [SPIRE 2010] DIEGO ARROYUELO, SENÉN GONZÁLEZ, MAURICIO OYARZÚN, "Compressed Self-indices Supporting Conjunctive Queries on Document Collections", in proceedings of the 17th Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE 2010), Lecture Notes in Computer Science, pp. 43-54, 2010.
- [Euro-Par 2008] CAROLINA BONACIC, MAURICIO MARÍN, CARLOS GARCÍA, MANUEL PRIETO-MATÍAS and FRANCISCO TIRADO, "Exploiting Hybrid Parallelism in Web Search Engines", In 14th European International Conference on Parallel Processing (Euro-Par 2008), Gran Canaria, Aug. 26-29, Spain, Lecture Notes in Computer Science 5168, pp. 414-423, Springer, 2008.

Publicaciones en revistas indexadas en ISI y Scopus

- [FINF 2013] VERÓNICA GIL-COSTA, CAROLINA BONACIC, ALONSO INOSTROSA, JAIR LOBOS, MAURICIO MARÍN, "Modelling Search Engines Performance using Coloured Petri Nets", accepted in *Fundamenta Informaticae*, 2013.
- [IPM 2012] DIEGO ARROYUELO, VERÓNICA GIL-COSTA, SENÉN GONZÁLEZ, MAURICIO MARÍN and MAURICIO OYARZÚN, "Distributed Search Based on Self-Indexed Compressed Text", *Information Processing and Management* 48 (5), pp. 819-827, Sept. 2012, (Elsevier).
- [PARCO 2010] MAURICIO MARÍN, VERÓNICA GIL-COSTA, CAROLINA BONACIC, RICARDO BAEZA-YATES, ISAAC D. SCHERSON, "Sync/Async Parallel Search for the Efficient Design and Construction of Web Search Engines", In *Parallel Computing* 36(4): 153-168, 2010 (Elsevier).

ÁREA GESTIÓN AMBIENTAL

Innovación en la gestión ambiental: el caso de insumos biotecnológicos creados sobre la base de microorganismos nativos

Francisco Bozinovic (Coordinador),
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Eduardo Donoso,
Bio Insumos Nativa Ltda

F. Fernando Novoa,
Centro de Ecología Aplicada Ltda.

Javier A. Simonetti,
Universidad de Chile.

Resumen

Definimos “Gestión Ambiental” como el conjunto de procesos productivos orientados a mejorar el bienestar del ser humano reduciendo los riesgos ambientales asociados a la producción de bienes y servicios. Es decir, serán aquellos que: a) realicen emisiones de gases invernadero balanceadas, b) usen eficientemente los recursos ambientales, c) sean neutros para la biodiversidad y d) participativos y con impactos positivos. En este sentido, este conjunto de procesos debiese traducirse en alta rentabilidad económica, social y ambiental. Siendo la gestión ambiental transversal a todos los sectores productivos, ejemplificaremos cómo esta gestión en el rubro agroforestal impacta en la producción de bienes y servicios. Usaremos el caso de BioInsumos Nativa Ltda., una empresa biotecnológica dedicada al desarrollo de soluciones biológicas sobre la base de microorganismos nativos para el control de plagas y enfermedades en cultivos agrícolas y forestales. Su propuesta está dada por un respaldo científico, con un nivel de eficacia igual o superior a las alternativas químicas, basado en una fuerte

línea de investigación y en la transferencia del producto a nivel de usuario final. Analizaremos el tema de *Trichonativa*, un formulado multicepa del hongo *Trichoderma* que ha mostrado altos niveles de control de enfermedades cuarentenarias en pino, así como mejoras en la calidad de plántulas en vivero. Este hongo biotransforma celulosa y hemicelulosa, participa en la mineralización del nitrógeno y de algunas proteínas, en la degradación y en la descomposición de la lignina y el humus. Estos procesos ayudan al crecimiento de la planta, aumentan el vigor germinativo a las semillas y provocan un mejor desarrollo de la raíz. Estos estudios básicos con cepas nativas ahora aplicados a procesos de innovación han demostrado que el mayor beneficio de este hongo para la gestión ambiental radica en su capacidad competitiva con microorganismos patógenos de las plantas y por su capacidad para producir secreciones extracelulares que causan desintegración y muerte en los fitopatógenos que habitan el suelo. Este es uno de los primeros biocontroladores nativos en insertarse en los programas de manejo en cultivos convencionales. Esta innovación no corresponde a un bien público, donde las fuentes de financiamiento provienen principalmente de recursos propios y de FIA e Innova. El proyecto de la empresa logró en un plazo de tres años generar una formulación prototipo de las cepas seleccionadas. Después de ser validado por un año a nivel comercial, a través de las ventas realizadas por la Universidad de Talca, se creó una empresa independiente. Este hecho generó una fundación, la que logró establecer un sistema de producción en escala comercial y la penetración del producto al mercado. La empresa efectúa exportaciones de bactericidas biológicos, donde se beneficia al sector exportador forestal y al de frutas. De esta forma, esta herramienta responde a las exigencias nacionales e internacionales por el uso de alternativas con bajo riesgo al ambiente y a la salud de los consumidores.

PARTE I: Aspectos generales, nacionales e internacionales, acerca de la Innovación en Gestión Ambiental

IA. Innovación en Gestión Ambiental

De acuerdo a la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos [OCDE] —en su artículo “Medición de las Actividades Científicas y Tecnológicas”—, la actividad de investigación y el desarrollo experimental (I+D) está definida como el trabajo creativo orientado a aumentar y generar nuevo conocimiento, así como el uso de esos conocimientos para generar nuevas aplicaciones. En esta línea, I+D incluye: a) investigación básica; b) investigación aplicada, y c) desarrollo.

Entendemos por innovación el proceso de creación (investigación) y entrega (transferencia) de nuevo valor a la sociedad. De hecho, conside-

ramos que innovación ocurre y surge desde cualquier ámbito del conocimiento, siendo la gestión ambiental uno más de ellos. En esta línea y en referencia a las actividades de innovación, la OCDE las define como el programa de etapas de investigación científico-tecnológicas, organizativas, financieras y comerciales (o productivas económicamente). Un protocolo de innovación en ciencia en general y en aquella que requiera una gestión ambiental —que es la mayoría sino todas las actividades de innovación— debiese incluir: inversiones y gastos en protocolos y programas de creación de nuevos conocimientos, que generen nuevos y mejores productos y/o procesos.

Por otra parte, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2010) define “economía verde” como aquella serie de procesos productivos orientados a mejorar el bienestar del ser humano reduciendo los riesgos ambientales asociados a la producción de bienes y servicios. En concordancia, se ha definido a la “gestión ambiental” como el conjunto de procesos que conducen al manejo sistémico del medio ambiente biótico y abiótico, incluyendo el desarrollo sustentable, orientado a lograr una adecuada calidad de vida o bienestar económico-social, y previniendo o mitigando los problemas ambientales. Es decir, la gestión ambiental propone los mecanismos para conseguir el desarrollo económico y humano, el uso racional de los recursos y la protección del ambiente. Además, la gestión ambiental propone las normas y políticas formuladas desde los entes públicos. Es decir, incorpora la política relacionada con la dirección pública o privada de los temas ambientales. Se incluye además en la gestión ambiental la evaluación del impacto ambiental de los procesos de innovación para determinar y establecer los efectos de ella sobre el ambiente, así como elaborar medidas controladoras de los efectos adversos sobre el ambiente. Por último, la gestión ambiental incluye la conservación de la biodiversidad y la educación ambiental. Es decir, en nuestra visión, los procesos productivos que incluyan gestión ambiental debiesen ser aquellos que además de realizar investigación básica, investigación aplicada y desarrollo, a) realicen emisiones de gases invernadero balanceadas, b) usen eficientemente los recursos ambientales, c) sean neutros para la biodiversidad y d) participativos.

En este sentido y para el área de innovación que requiera gestión ambiental, las actividades mencionadas son las mínimas que debiesen estar incluidas en un programa de innovación con gestión ambiental o en una “economía verde”, las que debiesen traducirse en alta rentabilidad económica, social y ambiental. Debemos enfatizar que el tema de la gestión ambiental es transversal a todos los sectores productivos, y por lo tanto la mayoría sino todos los procesos de innovación debiesen seguir los protocolos de una “economía verde” no solo por el valor ético y moral en el uso racional de los recursos del ambiente, sino que además por el beneficio económico que produce una producción limpia con estrategias preventivas, aplicada a los procesos, productos y servicios.

IB. Estado de desarrollo de la Innovación en Gestión Ambiental en Chile

Utilizando como fuente de información a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (<http://ri.conicyt.cl/575/propertyname-575.html>), en la Figura 1 se muestra el número de proyectos Fondecyt por año, relacionados con gestión en medio ambiente. Se observa que de los 200 proyectos aprobados desde el año 2000 al 2011, el 47,5 % tiene relación con gestión en ecosistemas acuáticos, el 31,0 % con gestión e innovación en el ambiente aéreo y el 21,5 % al suelo. Al analizar la información obtenida del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (<http://ri.conicyt.cl/575/propertyname-575.html>), en la Figura 2 se muestra el número de proyectos Fondef por año, relacionados con gestión en medio ambiente.

De los 34 proyectos aprobados desde el año 2000 al 2009, el 50,0 % tiene relación con el ambiente aéreo, el 29,4 % con gestión ambiental en ambientes acuáticos y el 20,6 % con gestión ambiental en suelo. Por otra parte, un análisis de los datos de innovación y gestión ambiental obtenidos de la Corporación de Fomento de la Producción indica que solo 15 proyectos han sido aprobados en relación con gestión ambiental. De estos, 14 tienen relación con el ecosistema acuático y uno con el ecosistema de suelo (información disponible a solicitud). Por último, sobre la base de datos del Instituto Nacional de Propiedad Industrial, se observa que siete patentes han sido inscritas en el Instituto Nacional de Propiedad Industrial desde el año 2000 hasta el 2008. De estas, cinco están relacionadas con gestión ambiental e innovación en sistemas acuáticos, una en ecosistemas de suelo y una en sistemas aéreos (Material suplementario disponible, solicitar a fbozinovic@bio.puc.cl).

IC. Innovación en la Gestión Ambiental y Biodiversidad

Existe una creciente demanda por bienes y servicios que sean generados de manera ambientalmente amigables. En la industria forestal nacional, de hecho, la dimensión ambiental sería el segundo criterio para adquirir productos luego de la calidad del mismo (Correa, 2007). A nivel internacional, la dimensión ambiental tiene una influencia marcada y creciente en la conducta de los consumidores (*e. g.*, Brown & Whalers 1998, Laroché *et al.*, 2001, D'Souza *et al.*, 2007). De igual forma, tratados internacionales como el Convenio de Diversidad Biológica (CBD), del cual Chile es signatario, tienen entre sus objetivos reducir las presiones directas sobre el entorno y promover la utilización sostenible de los recursos naturales.

La CBD por ejemplo espera que para el año 2020 las zonas destinadas a agricultura, acuicultura y silvicultura deberían gestionarse de forma tal que se asegure la conservación de la biodiversidad (UN, 2010). En este contexto, estrategias productivas para incrementar la productividad

y competitividad serían complementarias a la necesidad de ajustes productivos para satisfacer las crecientes demandas ambientales de los mercados nacionales e internacionales, requerimientos a los cuales las firmas exportadoras estarían progresivamente respondiendo (Scholz *et al.*, 1994), no obstante, en general, los ajustes productivos e institucionales en Chile tienden a ser reactivos y no proactivos (*e. g.* Pizarro, 2007). Un reflejo de ello es el bajo número de publicaciones científicas dedicadas a la innovación en gestión ambiental en el país.

En efecto, y después de realizar una búsqueda y levantamiento de información que incluyera los ítems de gestión ambiental e innovación en <http://apps.webofknowledge.com>, según este sitio y sobre la base de ISI web of Science, en el período 2000-2013 se han generado 110 publicaciones a nivel mundial referidas a innovación en la gestión ambiental, de las cuales 17 investigan o hacen referencia a innovaciones en gestión ambiental en Chile (Figura 3). Estas abarcan seis sectores productivos: agricultura, pesquerías, silvicultura, ganadería, minería y viticultura (Figura 4). En estos, los principales temas y motivaciones analizados son manejo de recursos/políticas de manejo, energías renovables, desarrollo tecnológico, estrategias para combatir la contaminación y producción limpia (Figura 5).

Quizás la conclusión más importante que emerge de este levantamiento de información cuantitativa es que, pese a su relevancia en la economía nacional, la inversión en innovación en muchos sectores productivos es baja. En el sector forestal por ejemplo, que representa un 3% del Producto Interno Bruto, la investigación científica en innovación y tecnología, particularmente en biotecnología ambiental, es muy baja o casi inexistente. Entre 1987 y 2006 se publicaron solamente 15 artículos, lo que representa un 0,5% de las publicaciones a nivel mundial (Vega & Romero, 2006). Pese a las numerosas críticas sobre el desempeño ambiental que recibe el sector referido, como por ejemplo en contaminación (*e.g.*, Luraschi, 2005), de las 15 publicaciones en biotecnología forestal del período, solamente una se aboca a temas ambientales (Vega & Romero, 2006).

En el ámbito ambiental existen aportes que conllevarían cambios en los modos de producción que implicarían sustanciales mejoras al desempeño ambiental, como lo demandan los consumidores, en tanto expresión de los intereses ciudadanos (*cf.* Drucker, 2002). Algunas de estas innovaciones no son patentables ni aumentarían necesariamente la rentabilidad, pero sí la competitividad al facilitar las certificaciones y cumplir con requisitos y acuerdos internacionales como la CBD. En este contexto, modificar la calidad de las plantaciones como hábitat secundario para fauna nativa es un ejemplo (Estades *et al.*, 2012). Las plantaciones forestales, especialmente monocultivos de especies exóticas, como es el caso chileno con las plantaciones de *Pinus* y *Eucalyptus*, son generalmente “desiertos biológicos”, ya que reemplazan los hábitats nativos, disminuyendo significativamente la riqueza y abundancia de especies.

Sin embargo, investigaciones experimentales han demostrado que un cambio menor en las prácticas como facilitar la presencia de un sotobosque desarrollado podría mejorar la calidad de las plantaciones como hábitat sustituto para especies nativas, mitigando sus frecuentes impactos negativos sobre la riqueza de especies. En efecto, se ha demostrado experimentalmente que la riqueza y abundancia de fauna nativa dependen de la presencia de un sotobosque desarrollado (Simonetti *et al.*, en prensa). De igual forma, experimentalmente se ha demostrado que el incremento diamétrico de los pinos adultos no es afectado por la presencia de sotobosque, por lo que mantener sotobosque no afectaría la productividad ni rentabilidad de la plantación (Simonetti, no publicados). Asimismo, desde una perspectiva de economía social, la ciudadanía estaría dispuesta a pagar precios más altos por productos forestales que provengan de plantaciones que efectivamente apoyen la conservación de la biota, asumiendo una eventual reducción en productividad (Simonetti, no publicados). Además, en términos estéticos, las personas prefieren paisajes forestales estructuralmente complejos, incluyendo las plantaciones de pino con sotobosque (Püschel-Hoeneisen & Simonetti, 2012). Esta evidencia sugiere que mantener sotobosque en plantaciones forestales mejoraría la calidad de las ellas como hábitat, contribuyendo a satisfacer los objetivos del Convenio de Diversidad Biológica en cuanto a conservar biodiversidad nativa al tiempo que satisface las crecientes demandas ambientales, en pos de la sustentabilidad y rentabilidad económica de la industria forestal (Simonetti *et al.*, 2012). A modo de conclusión general, queremos resaltar que si bien estos cambios no son patentables, representan innovaciones en la gestión ambiental que mejoran la competitividad y el acceso a nuevos mercados de la industria forestal.

PARTE II: El caso de insumos biotecnológicos creados sobre la base de microorganismos nativos

IIA. El caso del hongo *Trichoderma*

Este hongo fue descrito hace aproximadamente 200 años por los micólogos como un gasteromiceto. Aproximadamente 100 años después se analizó su estructura y función, y se clasificó entre los hongos filamentosos. Los científicos descubrieron sus propiedades para el manejo biológico de los cultivos agrícolas. El *Trichoderma* que habita en los ecosistemas de suelo posee aplicaciones comerciales para la regulación de los patógenos que atacan las plantas, y especialmente aquellas con valor comercial usadas en innovación (Villegas *et al.*, 2000) indican que el mecanismo de acción del *Trichoderma* se basa en la descomposición de la materia orgánica y por el antagonismo con microorganismos patógenos a las plantas. Este hongo biotransforma celulosa y hemicelulosa, participa en la mine-

ralización del nitrógeno y de algunas proteínas, en la degradación y en la descomposición de la lignina y el humus. Los procesos indicados ayudan al crecimiento de la planta, aumentan el vigor germinativo a las semillas, y provocan un mejor desarrollo de la raíz, entre otros beneficios. Estos estudios básicos ahora aplicados a procesos de innovación han demostrado que el mayor beneficio del *Trichoderma* para la agricultura y la gestión ambiental radica en su capacidad competitiva con microorganismos patógenos de las plantas, y por su capacidad para producir secreciones enzimáticas tóxicas extracelulares, que causan desintegración y muerte en los fitopatógenos que habitan el suelo.

La empresa BioInsumos Nativa Ltda. es un *spin-off* de la Universidad de Talca en Chile, siendo los propietarios tres ex alumnos de la misma casa de estudios, los señores Escobar, Lobos y Donoso. La empresa se originó como consecuencia de un proyecto de investigación, financiado por FIA. Este proyecto (FIA-PI-C-1998-1-A-072) buscaba en función de literatura científica internacional aislar, seleccionar y evaluar cepas nativas de hongos del género *Trichoderma*, para el control de enfermedades en plantas cultivadas en Chile. El proyecto en cuestión fue "Evaluación de formulaciones de microorganismos controladores de enfermedades y plagas en cultivos hortofrutícolas de importancia regional", y ejecutado en la Universidad de Talca entre los años 1998 y 2001. Los objetivos de este proyecto fueron evaluar formulaciones de microorganismos controladores de enfermedades y plagas en cultivos hortofrutícolas de importancia regional. Por otra parte, los objetivos específicos fueron: 1) Aislar e identificar cepas de virus granuloso y *Trichoderma* spp.; 2) disponer de un sistema que permita tener un *stock* constante de los controladores biológicos; 3) determinar cepas de controladores biológicos, formulaciones y formas de aplicación para el control de las enfermedades y plagas in vitro; 4) determinar cepas de controladores biológicos, formulaciones y formas de aplicación para el control de las enfermedades y plagas en cultivos experimentales, y 5) formar unidades de validación con productores orgánicos.

Los resultados obtenidos en este proyecto gracias al financiamiento FIA permitieron descubrir que en Chile existe una alta diversidad de microorganismos con potencial para control biológico, de los cuales muy pocos habían sido desarrollados hasta una etapa de utilización comercial. Respecto de las cepas seleccionadas de *Trichoderma*, se descubrió que todas mostraron acción sobre los patógenos estudiados, pero sus niveles de control variaron según el patógeno, demostrando un grado de especificidad en su acción. En términos del valor del proyecto, este permitió disponer de una herramienta tecnológica validada, con costos razonables y a disposición de la agricultura nacional. Además, se sentaron las bases para estudios posteriores y uso de *Trichoderma* en Chile, pues fue pionero en la selección de cepas endémicas. En referencia a la gestión del proyecto se destaca que dos de los investigadores

principales eran tesis de pregrado. A pesar de ello, la Fundación de Innovación Agrícola priorizó el valor de la idea y asumió los riesgos que ningún otro fondo de investigación en ese momento estaba dispuesto a tomar. Como consecuencia, el proyecto generó el mencionado *spin-off* BioInsumos Nativa SPA el año 2002. Este continuó con la fase de desarrollo comercial a través de una formulación de las cepas seleccionadas. Después de ser validada por un año a nivel comercial a través de las ventas realizadas por la Universidad de Talca, logró establecer un sistema de producción en escala comercial y generar la penetración del producto en el mercado. En suma, el tiempo de desarrollo total fue de cinco años. Por otra parte, los principales desafíos de esta empresa fueron estandarizar el prototipo inicial para una producción en escala. El segundo desafío fue la preparación del personal de la empresa, tanto para la producción como para generar una venta con alto nivel técnico. Esto permitió generar la transferencia de los resultados de recomendación de uso a nivel de agricultor. Las expectativas de la empresa, en un inicio, fueron generar un emprendimiento a nivel local, y limitado a la producción orgánica. No obstante, a partir de investigaciones conjuntas realizadas con la Universidad de Talca, se desarrollaron estrategias de control de enfermedades, que permitieron compatibilizar el uso de productos biológicos con productos químicos. Esto abrió el mercado de la producción convencional, lo que generó un gran impulso al uso de este producto. Paralelamente al desarrollo comercial del formulado de *Trichoderma*, tanto la Universidad de Talca en asociación con Nativa, así como la empresa en forma independiente, se adjudicaron una serie de fondos de investigación e innovación, tanto de FIA como de Corfo, esto basado en los niveles de éxito del primer proyecto. Estos nuevos fondos permitieron el desarrollo de dos nuevos productos, un bactericida y un insecticida biológicos, actualmente en el mercado y utilizados en los programas de control de dos plagas cuarentenarias. El proyecto FIA consistió en el desarrollo de una formulación de *Bacillus thuringiensis* para el control de lepidópteros, el que actualmente se encuentra en el programa de control oficial de *Lobesia botrana*. Por su parte, el proyecto Innova consistió en la continuación de un proyecto FIA ejecutado junto con la Universidad de Talca. Esto permitió el desarrollo de la formulación y un sistema de producción del bactericida biológico *Nacillus*, el que se encuentra en programa oficial de PSA (Bacteriosis del Kiwi). Este nuevo hecho genera grandes impactos económicos, ya que permite que el país cuente con herramientas de control ambientalmente sustentables para problemas sanitarios relevantes debido a los niveles de daño potenciales y a las limitaciones cuarentenarias que representan estos agentes de daño. En cuanto a este último proyecto, y debido a que BioInsumos era una empresa pequeña y emergente, los bancos no estaban dispuestos a entregar la boleta de garantía necesaria para que Corfo pudiera traspasar los fondos necesarios para ejecutar el proyecto

propuesto. Esto se debió principalmente al desconocimiento del manejo del riesgo tecnológico por parte de la banca. Finalmente, el Banco Chile logro entender el alcance de la investigación y respaldó el proyecto otorgando la boleta de garantía. Actualmente tanto la banca como Corfo han logrado agilizar y destrabar estos procesos.

Con posterioridad (véase artículo de acceso digital en FIA 2008) al primer proyecto FIA (FIA-PI-C-1998-1-A-072) se ha desarrollado una serie de nuevos proyectos de carácter público (financiados por FIA e Innova-Corfo) y otros estamentos privados, que han incorporado nuevos alcances de la técnica, así como nuevas zonas y cultivos y nuevas empresas e instituciones. Algunos de estos proyectos son: 1) Desarrollo de líneas transgénicas de vid con resistencia a enfermedades fungosas, Fondef y ejecutado por el Instituto de Investigaciones Agrarias (INIA), Fundación Chile, con Agrícola Brown Ltda. y Biogenetic S.A. como contrapartes; 2) Determinación de la viabilidad de conidias de *Trichoderma harzianum* bajo condiciones de anhidrobiosis, Fondecyt y ejecutado por la Pontificia Universidad Católica de Chile; 3) Inducción de defensa contra patógenos en plantas superiores: Participación de reguladores de crecimiento y microorganismos antagonistas, Fondecyt y ejecutado por la Universidad de Ciencias de la Educación; 4) Bases moleculares del control biológico de fitopatógenos, Fondecyt y ejecutado por la Universidad Nacional Andrés Bello; 5) Manejo integrado de enfermedades radicales del tomate mediante el uso de biocontroladores y solarización, Fondecyt y ejecutado por las universidades de Chile, Católica de Valparaíso y Nacional Andrés Bello; 6) Programa de desarrollo de productos bioactivos, financiado por la Universidad de Talca (DIAT); 7) Herbicidas, fungicidas y bactericidas de hongos fitopatógenos, financiado por la Universidad de Talca (Instituto de Cooperación Científica y Tecnológica Internacional, Chile-PortugalICCTI); 8) Aislamiento y caracterización de metabolitos secundarios microbianos con actividad herbicida, fungicida y bactericida de posible interés en la agricultura, financiado por la Universidad de Talca (Chile – Cuba – CITMA Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente); 9) Compuestos bioactivos de plantas y microorganismos chilenos, financiado por la Universidad de Talca (Programa de Cooperación Científica con Iberoamérica-España), y 10) Evaluación de cepas nativas de la bacteria *Bacillus subtilis* en el biocontrol de enfermedades bacterianas de cultivos hortofrutícolas de importancia regional, financiado por FIA y ejecutado por la Universidad de Talca.

La publicación “Resultados y lecciones en Biocontrol de Enfermedades Fungosas con *Trichoderma* spp.” e información adicional sobre los proyectos precursores y los contactos con los productores y profesionales participantes, se encuentran disponibles en el sitio de FIA (www.fia.gob.cl). Por otra parte, la información detallada con los actores del sector de innovación, los resultados, experiencias y lecciones aprendidas so-

bre control de enfermedades fungosas con *Trichoderma* spp. en el país, a partir de proyectos financiados por la Fundación para la Innovación Agraria, se encuentran en la referencia FIA (2008) de este artículo.

IIB. Aspectos institucionales que han influido (o no) en el ejemplo estudiado.

Sobre la base de los eventos anteriormente indicados se logró generar una unidad de desarrollo al interior de la empresa, lo que permitió: a) el desarrollo a velocidad de empresa de nuevos productos y b) generar una base científica importante. Esto último apoya el uso a nivel de agricultor de los productos comerciales, ya que todas las recomendaciones de uso se basan en investigación científica (e.g. Donoso *et al.*, 2008a). Esto ha permitido que la empresa se posicione con una imagen de productos de alta calidad, siendo su sello de diferenciación la generación de información científica tanto por publicaciones en revistas ISI y SCIELO, así como por presentaciones en congresos de especialidad nacionales e internacionales (e.g. Donoso *et al.*, 2008b). Por otra parte se constituyó una estructura exitosa que facilita la interacción con centros de investigación públicos, universidades o unidades de investigación de ministerios, así como con empresas, entre ellas BASF y otros centros de investigación privados. Esto ha potenciado el nivel de investigación tanto en profundidad como en diversidad de temáticas. Véanse además otras experiencias comerciales con *Trichoderma* en FIA (2008). Como ya se indicó, el caso de estudio analizado en el marco de la gestión ambiental e innovación es el de *Trichonativa*, un formulado multicepa del hongo *Trichoderma* spp., que ha mostrado altos niveles de control de enfermedades cuarentenarias en pino, así como mejoras en la calidad de plántulas en vivero. Además es uno de los productos base de los programas de uva de mesa, permitiendo tanto reducir las pérdidas por pudriciones en campo como en poscosecha, incrementando la vida de la fruta. Este es uno de los primeros biocontroladores nativos en insertarse en los programas de manejo en cultivos convencionales.

IIC. El modelo de negocio

El modelo de negocio ha sido desarrollar y comercializar productos biológicos amigables ambientalmente, que se posicionen en el mercado como productos *premium* y cuya principal característica de calidad sea la eficacia. Esta diferenciación en calidad se basa en desarrollo y experimentación de laboratorio —que permitió establecer mecanismos biológicos de acción, desarrollo de sistemas de producción escalables y formulaciones— e investigación de campo, donde aplicando modelos de las ciencias ecológicas se logró generar estrategias de uso del producto.

Esto ha permitido control e integración con alternativas químicas, validándose así sus usos con información científica, la que es transferida a distribuidores, asesores y agricultores en la forma de planes de manejo.

BioInsumos Nativa posee el 50% del mercado de plaguicidas biológicos de Chile. Esta empresa demostró que para resolver un problema productivo con incidencia ambiental y economía limpia, se requiere abarcar los tres cuadrantes del conocimiento: 1) El cuadrante Bohr, que incluye investigación científica en la selección/identificación de cepas, determinación de mecanismos de acción y procesos ecológicos; 2) el cuadrante Pasteur, que incluye desarrollo tecnológico de modelos de producción limpia, formulación, y estrategia de uso, y 3) el cuadrante Edison, en el que se logra el escalamiento comercial de la producción y desarrollo de las estrategias de uso a nivel de usuario final y del modelo económico de negocio.

IID. Compromisos y restricciones en la relación academia-empresa

La relación con entidades académicas se presenta en diversos aspectos, uno es la contratación de investigaciones *ad hoc*, en especial en temáticas fuera del ámbito de competencias de la empresa. En el ámbito de competencias se han generado relaciones de desarrollo conjunto con una estructura horizontal. Por otra parte, dos de los socios de la empresa son profesores universitarios, uno a jornada parcial y el otro a jornada completa, por lo que constantemente se desarrollan tesis de pre y posgrado dentro de la empresa.

No obstante lo anterior, uno de los más relevantes problemas de la empresa es la dificultad de reclutar investigadores, siendo la principal competencia la alta disponibilidad de becas para realizar posdoctorados en universidades. Esto limita la oferta de científicos dispuestos a realizar investigación en las empresas en general, y en esta en particular. Pensamos que este fenómeno se debe al hecho de su ubicación en regiones, así como por el nivel de exigencia que significa realizar investigación al interior de una empresa. Esto, pues el trabajo en una empresa privada, cuyo fin es generar ganancias económicas, presenta dificultades importantes en cuanto a forma (plazos, presupuestos y foco), así como de fondo, donde se busca generar información confidencial con el fin de tomar decisiones con valorización económica y no de lograr una publicación científica. Finalmente, la Tabla 1 muestra un resumen con los ítems y eventos más importantes realizados por la empresa.

III. Recomendaciones y conclusiones

El problema de integrar innovación en la gestión ambiental en nuestra región es relativamente reciente (véase Matus, 2001). En esta línea, los países de América Latina y Chile no son la excepción, pues han comen-

zado a definir políticas, prioridades, programas y actividades, aun en la ausencia de información científica básica. A modo de recomendación, queremos insistir en la idea de que una regla a seguir en innovación que requiera una gestión ambiental —que incluye a prácticamente toda las actividades de innovación— debiese considerar inversiones y gastos en programas de creación de nuevos conocimientos con una base científica fuerte, y que no solo se preocupe de generar nuevos y mejores productos sino que además los procesos de producción sean ambientalmente amigables.

De acuerdo con Friedmann (2001) y en referencia a los requerimientos de investigación científica en medio ambiente e innovación, podemos concluir que el proceso de innovación en la gestión ambiental es un proceso dinámico, donde sin duda se aplican principios empresariales, pero sustentados sobre una base científica sólida. Sin embargo, dada la complejidad de los sistemas ecológicos —que son la plataforma donde se realiza el acto de innovación—, es necesario considerar los términos de error o las incertidumbres como variables importantes en los planes de innovación en la gestión ambiental. Parece obvio que el Estado de Chile debe tomar decisiones en materia de gestión ambiental en concordancia con las políticas de innovación, lo cual implica cautelar por el uso racional y sustentable de los recursos.

Concluimos y recomendamos que para ejecutar esta acción las instituciones del Estado deben contar con información básica de calidad sobre los distintos aspectos ambientales en que se ejecuta la innovación. Sobre la base de la información recolectada debemos concluir que esta situación es prácticamente inexistente en el país. En efecto, contar con un diagnóstico mínimo y adecuado, basado en información científica de las condiciones ambientales en que se ejecutará el proceso innovativo, permite otorgar prioridad y tomar decisiones adecuadas que permitan generar perfeccionamiento y formación de capital humano altamente calificado y competitivo, la creación de nuevas visiones en el mundo público y privado, el incremento y transformaciones en formas de inversión y competitividad, la creación de nuevas empresas, el uso racional de los recursos naturales y, como consecuencia de lo anterior, el acceso a nuevos mercados.

Debemos enfatizar que innovación con gestión ambiental es un área transversal de la economía, donde generar investigación y sugerir protocolos técnicos orientados a conservar biodiversidad no son necesariamente patentables, pero representan innovaciones en la gestión ambiental que mejoran la competitividad de la industria y el acceso (o la mantención en) a mercados emergentes y/o establecidos. En la actualidad, las empresas socialmente responsables debiesen contribuir al cuidado del medio ambiente y con investigación de calidad. Desde nuestra perspectiva, esta es la única manera de generar el conocimiento necesario para minimizar el impacto que pudieran provocar sus acciones,

dándole al país la seguridad de que el quehacer productivo es avalado con acciones sustentables que traspasan el cumplimiento de las normativas. Sin embargo, son muy pocas las empresas que invierten en generar conocimiento básico, y menos en innovación, con el objetivo genuino de mejorar su gestión ambiental integral.

La sustentabilidad a la que todos debemos aspirar en un Chile desarrollado implica una mirada global desde el punto de vista de la innovación en la gestión ambiental, pero además implica una visión en detalle de los sistemas naturales, lo que hace imprescindible disponer de los recursos para la investigación y el desarrollo del conocimiento científico como base y condición de los procesos de innovación.

Literatura citada

- BROWN, J.D., y WAHLERS, R.G. (1998) The environmentally concerned consumer: an exploratory study. *Journal of Marketing Theory and Practice* 6: 39-47.
- CORREA, M.E. (2007) Leading change in Latin America. *Harvard Business Review* 85 (10): 40-42.
- DONOSO, E.P., G.A. LOBOS y N. ROJAS (2008a) Efecto de *Trichoderma harzianum* y compost sobre el crecimiento de plántulas de *Pinus radiata* en vivero. *Bosque* 29(1): 52-57.
- DONOSO, EP, RO BUSTAMANTE, M. CARU y H.M. NIEMEYER (2008b) Water deficit as a driver of the mutualistic relationship between the fungus *Trichoderma harzianum* and two wheat genotypes. *Applied and Environmental Microbiology* 74(5): 1412-1417.
- D'SOUZA, C., TAGHIAN, M. y KHOSLA, R. (2007) Examination of environmental beliefs and its impact on the influence of price, quality and demographic characteristics with respect to green purchase intention. *Journal of Targeting, Measurement and Analysis for Marketing* 15: 69-78.
- DRUCKER, P.F. (2002) The discipline of innovation. *Harvard Business Review* 80: 95-104.
- ESTADES, C.F., GREZ, A.A. y SIMONETTI, J.A. (2012) Biodiversity in Monterrey pine plantations, in Simonetti, J.A., Grez, A.A. & Estados, C.F. (eds.). *Biodiversity conservation in agroforestry landscapes: challenges and opportunities*. Editorial Universitaria, Santiago: 77-98.
- FIA (2008) Resultados y lecciones en biocontrol de enfermedades fungosas con *Trichoderma*. Proyecto de Innovación Regiones de O'Higgins y del Maule, Ministerio de Agricultura. Serie Experiencias de innovación para el emprendimiento agrario, 62: 28 pp. http://bibliotecadigital.fia.cl/gsd1/collect/publicac/index/assoc/HASH9e20.dir/62_Libro_Trichoderma.pdf
- FRIEDMANN, C. (2001) Análisis en torno a los requerimientos de investigación ambiental. Cepal - Series Seminarios y Conferencias, 9: 99-
- LAROCHE, M., BERGERON, J. y BARBARO-FORLEO, G. (2001) Targeting consumers who are willing to pay more for environmentally friendly products. *Journal of Consumer Marketing* 18: 503-520.

- LURASCHI, M. (2005) Análisis de la cadena productiva de la celulosa y el papel a la luz de los objetivos de desarrollo sostenible: estudio del caso de Chile. Cepal, Documento de Proyecto ROA/49, Santiago.
- MATUS, P. (2001) Desafíos de la investigación en materias ambientales. Cepal-Series Seminarios y Conferencias, 9: 105-111.
- PIZARRO, R. (2007). La reforma ambiental en Chile. *Journal of Technology Management & Innovation* 2(2): 3-6.
- PNUMA (2010) Avances y progresos científicos en nuestro cambiante medio ambiente. Programa de Naciones Unidas para el medio ambiente. 80 pp.
- PÜSCHEL-HOENEISEN, N. y SIMONETTI, J.A. (2012) Forested habitat preferences by Chilean citizens: implications for biodiversity conservation in *Pinus radiata* plantations. *Revista Chilena de Historia Natural* 85: 161-169.
- SIMONETTI, J.A., GREZ, A.A. y ESTADES, C.F. (EDS.) (2012) Biodiversity conservation in agroforestry landscapes: challenges and opportunities. Editorial Universitaria, Santiago. 162 pp.
- SIMONETTI, J.A., GREZ, A.A. y ESTADES, C.F. EN PRENSA. Providing habitat for native mammals through understory enhancement in forestry plantations. *Conservation Biology*.
- SCHOLZ, I., BLOCK, K., FEIL, K., KRAUSE, M., NAKONZ, K. y OBERLE C. (1994) Medio ambiente y competitividad: el caso del sector exportador chileno", Instituto Alemán de Desarrollo, Estudios e Informes 13/1994, Berlín.
- UN (UNITED NATIONS) (2010) United Nations Convention on Biological Diversity, Strategic Plan for Biodiversity 2011–2020, including Aichi Biodiversity Targets. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal (accessible en: www.cbd.int/sp).
- VEGA, A., y ROMERO, L. (2006) Innovación tecnológica forestal, desarrollos y desafíos científico-tecnológicos en Chile. *Journal of Technology Management & Innovation* 1: 71-82.
- VILLEGAS E., J. BERNARDO, CASTAÑO Z., y C. JAIRÓ (2000) Identificación de aislamientos promisorios de *Trichoderma* spp. Para el manejo de la pudrición de la corona y raíz del manzano (*Malus domestica*, Borkh) en Caldas. En: Fitotecnia. Manizales: Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Fitotecnia.

Figuras

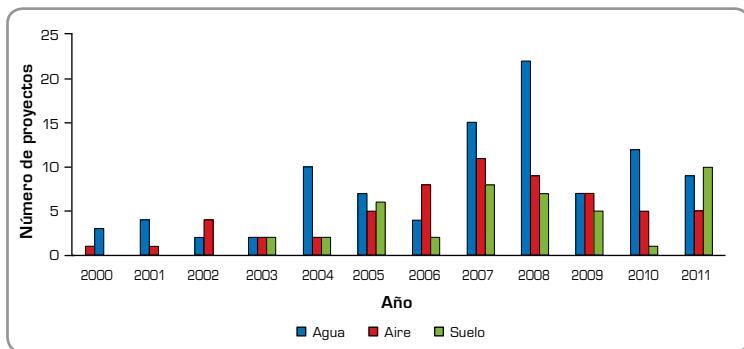


Figura 1: Número de proyectos Fondecyt por año, relacionados con gestión en medio ambiente. Elaboración propia basada en <http://ri.conicyt.cl/575/propertyname-575.html>

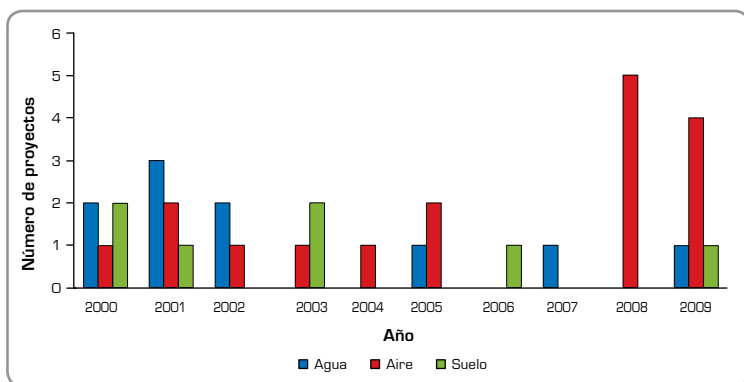


Figura 2: Número de proyectos Fondef por año, relacionados con gestión en medio ambiente. Elaboración propia basada en <http://ri.conicyt.cl/575/propertyname-575.html>

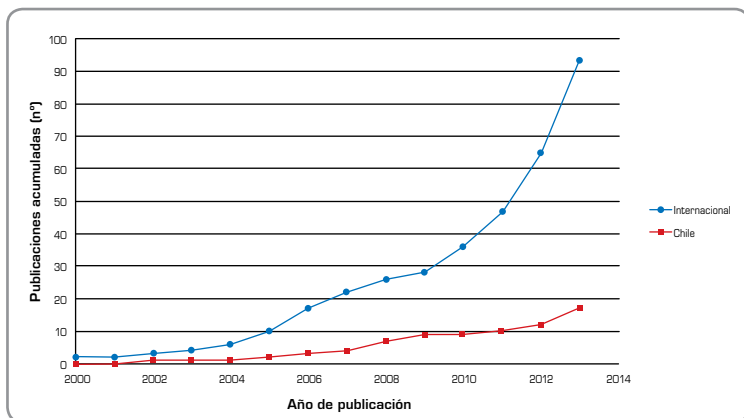


Figura 3. Número de publicaciones acumuladas en el período 2000- 2013 que investigan o hacen referencia a innovaciones en gestión ambiental en Chile y en otros países del mundo (Internacional). Elaboración propia basada en ISI web of science.

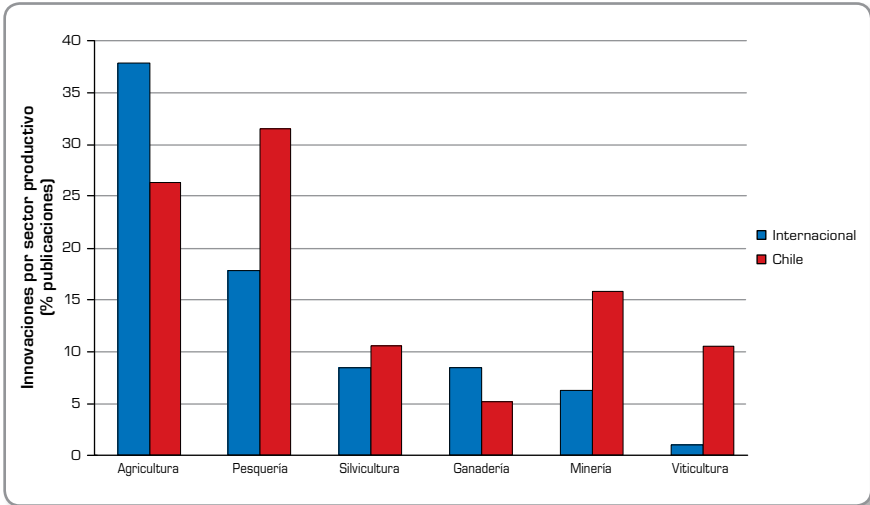


Figura 4. Porcentaje de artículos con innovaciones por sector productivo a nivel nacional e internacional (sin incluir Chile). Elaboración propia basada en ISI web of science.

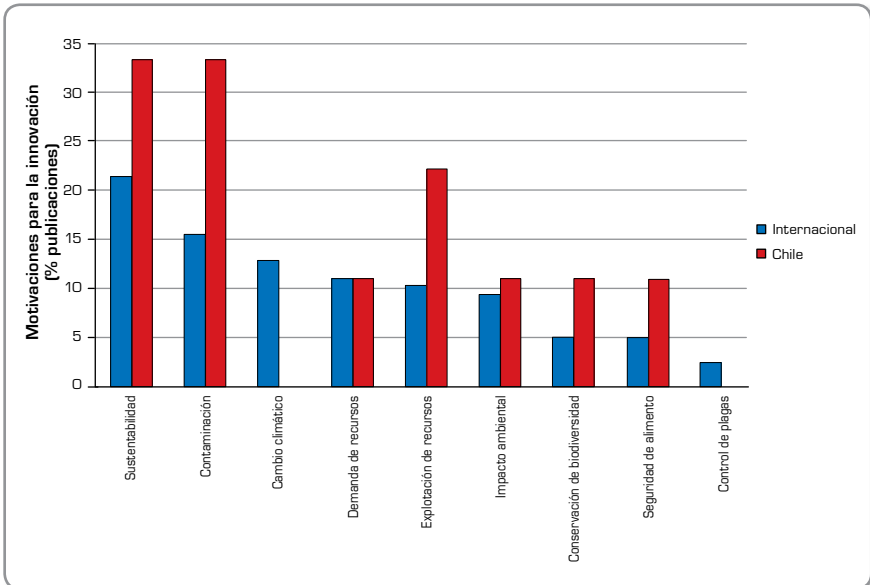


Figura 5. Principales motivaciones para generar innovación en gestión ambiental. Elaboración propia basada en ISI web of science.

Información técnica del proyecto

Tabla 1. Actividades realizadas por la empresa Biolnsumos Nativa Ltda. en el área de gestión ambiental e innovación.

Financiamiento	Fuentes	FIA / privado
	Montos	60/150
Tiempo involucrado (desde la idea a la innovación)	5 años	
Patentes o registros de protección industrial	Solicitudes (n° de solicitudes)	Nacionales: 3
		Internacionales: 3
	Concesiones (n° de Patentes)	Nacionales:
		Internacionales:
Investigadores/gestores	8	
Industria que adoptó la innovación	Industrial agrícola y forestal, todos los rubros (Ejemplos de empresas: Arauco, Unifrutti, Copefrut, Garces, San Pedro, Del Monte, Greenvic, etc.).	
Inversión en la innovación	- La inversión en investigación y desarrollo anual con fondos propios es en promedio de \$150.000.000 - Todos los años se inician uno o dos proyectos de investigación, propios o en asociación con otras empresas o universidades. - En este momento se ejecutan 2 FIA, 2 Innova, 1 proyecto privado con una empresa, 1 proyecto como asociado con una universidad y hay 2 subcontratos de investigación con universidades.	

ÁREA MINERÍA

El Convertidor Teniente. Un caso emblemático de innovación tecnológica en minería

Carlos Conca (Coordinador),
CMM-DIM, Universidad de Chile.

Ramón Fuentes,
JRI-Ingeniería Ltda.

Raúl Gormaz,
CMM-DIM, Universidad de Chile.

Patricio Ruz,
AMEC International Ltda., Mining & Metals.

Leandro Voisin,
Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile.

Introducción

A vuelta de la década de 1960, Chile adquiere 51 % de la mina El Teniente. El acuerdo con Kennecott, dueño original, fue expandir la producción anual de cobre de 165.000 a 254.000 toneladas. El proceso de fundición se convirtió en el cuello de botella para esta nueva meta, debido a problemas inesperados durante la fusión de concentrado y conversión de mata de cobre mediante inyección de oxígeno. Hermann Schwarze, ingeniero de minas de la Universidad de Chile, lideró un grupo de profesionales que exploró usos eficientes y efectivos de la capacidad existente y del suministro de oxígeno. Así, primero se desarrolló un nuevo quemador 100 % "oxígeno-petróleo" para el horno de reverbero en 1975 y, posteriormente, en enero de 1977, se pone en funcionamiento el Convertidor Teniente (CT), año en que también se concedió la patente nacional n.º 30.226 a la División

El Teniente de Codelco por el proceso continuo de fusión y conversión de concentrado de cobre y el aparato para realizarlo. Se logró una producción cercana a las 700 ton/día.

Conseguir el *sponsor* de Codelco en una fundición fue crucial en esta innovación. Se logró iniciar en El Teniente, y desarrollarse finalmente en Chuquicamata. Hubo necesidad de desarrollar metodología de innovación y para ello se incorporó a mandos medios y trabajadores de fundiciones a los trabajos de laboratorio –con maquetas físicas muy bien escaladas–. Así, Codelco obtuvo un grupo con experiencia industrial y alta calificación académica. Luego, Codelco exporta esta innovación a Perú, México, Zambia y Tailandia a contar de la década de 1980.

Para mejorar la productividad, el control de procesos y la disponibilidad de equipos, Codelco e IM2¹ iniciaron, a fines de los años 90, un programa destinado a aumentar la eficiencia de inyección y reacción de oxígeno en baño fundido. El programa aportó conocimientos en fluido-dinámica, metalurgia y ciencia de los materiales, con resultados beneficiosos al incrementar la capacidad de fusión desde 1.800 a 2.200 ton/día.

Con la meta de alcanzar 3.000 ton/día se planteó una asociación con el CMM², parcialmente financiada por un proyecto Fondef, logrando cumplir el objetivo de desarrollar e implementar modelos físico-matemáticos que permitiesen el análisis y simulación de la fenomenología de fusión. El modelamiento fluido-dinámico, apoyado en los fenómenos de transporte, la termodinámica, la teoría de ecuaciones en derivadas parciales y los métodos numéricos, han sido las áreas principales del conocimiento conducentes al análisis de los fenómenos de inyección de gases, fusión de fases sólidas, estabilidad del baño metalúrgico y estabilidad de los materiales refractarios que componen la mampostería de los reactores en donde se lleva a cabo el proceso a temperaturas del orden de 1.250 °C.

El CMM aporta un alto nivel académico y demostrada capacidad para ir desde el análisis fundamental de la fenomenología hasta su simulación computacional (FDC). Se conformó así un equipo de desarrollo tecnológico en modelamiento matemático de fenómenos de transporte de sistemas multifásicos en procesos minero-metalúrgicos.

En el ámbito industrial se generaron recomendaciones específicas, provechosas para el proceso de la fusión de concentrados en el CT, y plasmadas en cuatro nuevas patentes nacionales (n.º 42.793, 42.977, 43.683 y 44.920):

- Aumento en la eficiencia del uso de oxígeno
- Control del oleaje del baño fundido
- Disminución de acreciones
- Duración del recubrimiento refractario

1 Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia.

2 Centro de Modelamiento Matemático, Universidad de Chile.

Hacia el término del proyecto de simulación física y matemática de interfaces en reactores pirometalúrgicos de cobre, a partir del conocimiento de los fenómenos de inyección de gases y de concentrado, se implantan exitosamente las prácticas operacionales de soplado e inyección de concentrado en régimen denso, alcanzándose la meta de fusión de 3.000 ton/día.

Pirometalurgia. Descripción global

Minerales y metales: Origen y conceptualización

La historia de la pirometalurgia se remonta, a lo menos, hace 6.000 años. Cobre, plata y oro son los primeros metales utilizados, ya que se encontraban en estado nativo. Trozos de metal hallados entre las cenizas les enseñaron a los primeros pirometalurgistas que podían usar el fuego para convertir minerales en metales y aleaciones. Desde un comienzo se tuvo especial atención en distinguir todo aquello que difiere de las “piedras ordinarias” por su color, brillo y peso. De ahí nace una enorme tentación de incorporar al horno otros materiales “no ordinarios”, simplemente *para ver qué sucede*. Este *para ver* ha sido siempre la clave del progreso científico y material. En experimentos repetidos infinidad de veces se variaron dos factores principales: la temperatura y la proporción de los materiales introducidos al fuego.

De los ceramistas de Mesopotamia (VI milenio a. C.) llega el horno de reverbero que permitió alcanzar temperaturas de 800 a 1.050 °C. La cúpula de estos hornos refleja el calor hacia el piso; se dice que lo “reverbera”, economizando mucha energía (leña o carbón de madera). El hogar o cámara de fusión se encuentra bajo el piso, un tanto separado, y es vigorosamente ventilado por un soplador.

De la pirometalurgia del hierro a la siderurgia

El inicio de la Edad del Hierro en la mayor parte del mundo coincide con el primer uso generalizado de un tipo de horno llamado *bloomery*³, cuyo producto era un hierro poroso que actualmente se conoce como hierro esponja. China ha sido considerada como la excepción a la generalización de *bloomeries*. Se pensaba que los chinos se habían saltado completamente la tecnología *bloomery*, y que habrían introducido directamente el empleo de los altos hornos para la fusión de óxidos de hierro⁴. Pruebas

3 El *bloomery* fue el primer tipo de horno (primera forma de fundición) capaz de fundir óxidos de hierro. El producto de un *bloomery* es una masa porosa de hierro y escoria llamada hierro esponja. Esta mezcla de escoria y hierro es usualmente consolidada y transformada en hierro forjado. El *bloomery* fue remplazado en gran medida por los altos hornos, que producen arrabio (pig iron).

4 En el siglo V a. C., los pirometalurgistas del sureño estado de Wu inventaron el alto horno como medio para producir arrabio (hierro rico en carbono) a partir del mineral de hierro.

recientes, sin embargo, muestran que hornos tipo *bloomeries* fueron utilizados con anterioridad en China, y que habrían migrado a Occidente hacia el 800 a. C. antes de ser remplazados por los altos hornos desarrollados localmente.

Hasta aquí los antiguos tenían hierro, pero no acero. El producto de estos altos hornos era una aleación líquida entre hierro y carbón, llamada arrabio, que contenía abundantes impurezas. El primer paso para lograr la transformación masiva del arrabio en acero lo dio el inglés Henry Bessemer en 1856. La idea de Bessemer era simple: eliminar las impurezas del arrabio líquido y reducir su contenido de carbono mediante la inyección de aire en un convertidor de arrabio en acero.

Actualmente, los convertidores de arrabio en acero ya no son como los de Bessemer y sus contemporáneos. Son conocidos generalmente por sus iniciales en inglés como convertidores BOF (Basic Oxygen Furnace), logrando la conversión del arrabio con el uso de la misma idea de Bessemer para eliminar las impurezas y el exceso de carbono por oxidación, además de aprovechar el calor de la oxidación del carbono como fuente de energía para mantener la temperatura del proceso.

Pirometalurgia de metales no ferrosos

Las producciones mundiales durante 2012 de los principales metales fueron (en millones de toneladas) de 1.500 para el hierro y acero, 44,9 el aluminio, 17,0 el cobre, 13,0 el cinc, 5,2 el plomo, 2,1 el níquel, 0,75 el magnesio y 0,19 el titanio [US Geological Survey, 2012]. Se aprecia que por lejos la producción de hierro y acero es la más importante, mientras que el cobre ocupa el tercer lugar, detrás del aluminio.

Después de la II Guerra Mundial se vivió, principalmente en Norteamérica, un período de prosperidad sostenida, que permitió que compañías de la industria de metales no ferrosos (principalmente cobre) financiaran sus propios desarrollos tecnológicos. Hasta 1970 duró la llamada “era de oro” en la cual tecnologías originales de fines del siglo XIX y principios del siglo XX fueron significativamente adaptadas, mejoradas y actualizadas.

Pero tiempos difíciles llegaron a Norteamérica en los años 80, debido a los mayores costos de la energía y a restricciones ambientales más estrictas. A lo que se agregó un crecimiento menor del esperado en las economías emergentes, así como la competencia con nuevos productores con menores costos comparativos, como Chile en el caso del cobre.

La industria norteamericana aceptó el reto y se resucitó a sí misma en muchos aspectos, principalmente gracias a la adopción de nuevas tecnologías y su integración en un nuevo modelo económico global. Desde hace un par de décadas, Norteamérica entró en una nueva “era de oro” como proveedor de materiales y tecnología para las economías emergentes. Esto lo ha logrado mediante un buen aprovechamiento de la potencia

del computador y de su relación con la disponibilidad global de información. Esto ha sido posible, también, en buena parte, por el fuerte desarrollo de los centros de investigación que estas empresas crearon durante la “era de oro” [King, 2007].

Las nuevas tecnologías se beneficiaron de la incorporación de conocimiento científico para comprender el funcionamiento de los nuevos procesos y la utilización de modelos matemáticos que, en combinación con las nuevas generaciones de computadores, permitieron simular dichos procesos con una precisión razonable [Szekely, 87; Themelis, 94].

Así, en metalurgia extractiva emergen dos pilares científicos constituidos por la termodinámica química y los fenómenos de transferencia (como son la cinética química, la mecánica de fluidos y los fenómenos de transferencia de masa, *momentum* y calor). Sépase que la base científica en esta área, previo a 1950, era muy limitada [Themelis, 94]. El computador llevó al desarrollo de compilaciones extensivas de datos. A su vez, el trabajo de científicos y metalurgistas de la academia inspiró a ingenieros de la industria a pilotear y testear nuevos procesos que iban a producir más metal, con menor consumo energético y costos ambientales reducidos.

Pirometalurgia del cobre

El siglo XX y su rol

La segunda mitad del siglo XX es un período de especial florecimiento de la pirometalurgia. Es así como la producción anual de cobre, que en 1900 era de 500.000 toneladas, pasa a más de 10.000.000 en 1990. Sorprendentemente, resulta así que más cobre fue extraído, producido y consumido en el siglo XX que durante la totalidad de los 60 siglos precedentes [Themelis, 1994].

Un gran paso: la fusión *flash*

En las fundiciones de cobre, y en general, en toda la metalurgia extractiva, la necesidad de mayor eficiencia energética y de disminución del impacto ambiental, se hizo cada vez más crítica. Un cambio fundamental en la pirometalurgia del cobre se inicia cuando la empresa finlandesa Outokumpu y la canadiense Inco comienzan a trabajar en el concepto de fusión *flash*, en la década de 1940. La necesidad de intensificar y lograr una mayor eficiencia en el proceso de fusión se abordó mediante el aumento de la concentración de oxígeno inyectado en el gas de reacción, inicialmente, a través de quemadores, y posteriormente, por toberas o lanzas. Esta tecnología se inspiró del convertidor Bessemer (patentado en 1855), desarrollado por la industria acerera inglesa durante el siglo XIX [King, 2007].

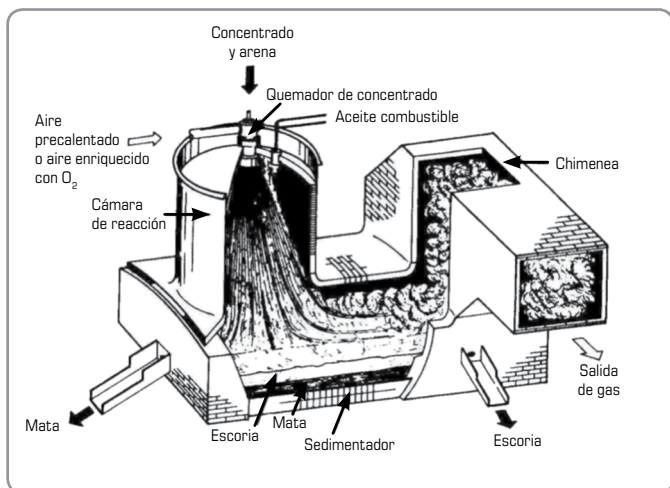


Figura 1. Horno flash (Outokumpu).

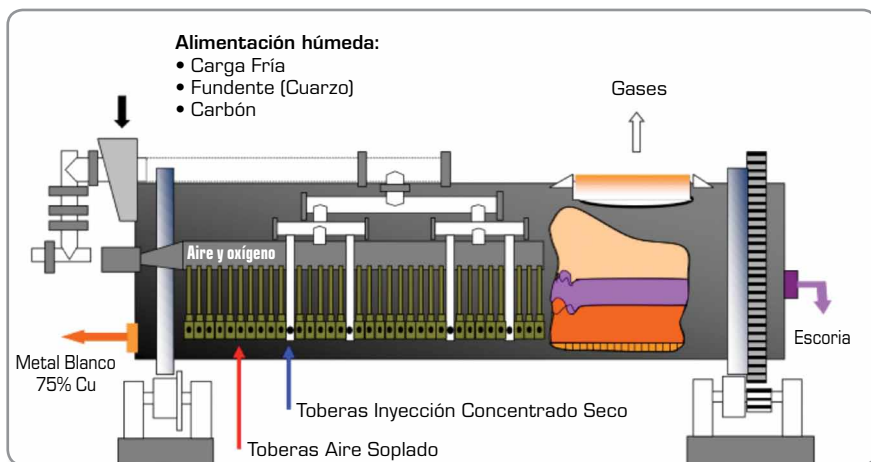


Figura 2. Convertidor Teniente (Codelco).

La tecnología de fusión *flash* (Figura 1), desarrollada por Outokumpu e Inco, se caracteriza por la inyección de aire enriquecido con oxígeno y oxígeno puro, respectivamente, a través de quemadores de concentrado, mientras que las tecnologías Mitsubishi e Isasmelt utilizan lanzas verticales de inyección, permitiendo aumentar la tasa de fusión por agitación del baño fundido. El reactor Noranda y el Convertidor Teniente (Figura 2), que se desarrollaron en esta misma época, dieron lugar a una variante en la intensificación de la fusión del concentrado al incorporar la tecnología de inyección, tanto de concentrado como de aire enriquecido con oxígeno mediante toberas sumergidas independientes. Todas estas tecnologías aumentan la disolución del oxígeno en el baño fundido y su

interacción con el hierro y el azufre contenidos en el concentrado para formar escoria y anhídrido sulfuroso, respectivamente, así como, consecuentemente, una fase fundida de mata o metal blanco de alto grado o alto contenido de cobre, que es enviada, posteriormente, a la siguiente etapa de conversión, permitiendo aumentar las capacidades de las funciones.

Reactores pirometalúrgicos de fusión

Generalidades

En la pirometalurgia del cobre, los reactores juegan un rol primordial. La primera operación unitaria del proceso productivo del metal, a partir de concentrados sulfurados primarios que lo contienen, corresponde a la fusión y es aquí en donde existe una larga historia y consecuente evolución que tiene relación con el Convertidor Teniente (CT).

La etapa de fusión considera, independiente de su tecnología, no solo la alimentación de concentrado, sino también de fundente y, eventualmente, retornos como carga fría, e hidrocarburos que al combustionar proporcionan el calor que las reacciones de oxidación exotérmicas de los sulfuros contenidos en el concentrado no son capaces de entregar. Es así que en esta sección, cuando hablemos de alimentación a la etapa de fusión, nos referiremos a la suma de componentes, a menos que se detalle su excepción.

En la fusión de concentrados se pueden distinguir tres grupos o mecanismos que involucran el diseño, la fluido-dinámica y la transferencia de calor. Difieren entre ellos, principalmente, por la forma en que se alimentan los concentrados y el gas de reacción, que por lo general resulta ser aire enriquecido con oxígeno. De acuerdo a lo anterior y considerando los tres grupos, hablaremos de fusión por calentamiento, por suspensión o en baño.

Fusión por calentamiento

La aparición de reactores de fusión de cobre por calentamiento data de la Edad Media, cuando alemanes y suecos comenzaron a utilizar hornos de cuba para llevar a cabo procesos de tostación reductora multietapa. En el año 1700 comenzaron a ser construidos los hornos de reverbero, donde se realizaba tostación de mineral de cobre, también multietapa, y que constituyen la base tecnológica del alto horno y del reverbero de fusión del siglo XX. Posteriormente se desarrolla la tecnología del horno eléctrico para fusión de mata, que en la actualidad resulta ser el reactor más utilizado en el proceso reductor de limpieza de escorias para recuperar el cobre metálico atrapado en dicha fase hacia una mata que se envía a conversión.

Fusión por suspensión o autógena

Las pruebas preliminares concernientes a este tipo de fusión datan de 1946, mientras que la primera operación industrial comienza en 1949 en la fundición de Harjavalta, Finlandia, en un horno denominado Flash Outokumpu Oy. Este reactor constituye, a la fecha, el equipo de fusión más utilizado en la industria del cobre, sobrepasando las 30 unidades. Por su parte, la versión canadiense, denominada reactor Flash Inco, que difiere de la versión finlandesa por la inyección de oxígeno puro como agente de reacción en comparación a aire enriquecido con oxígeno, comienza sus pruebas preliminares a fines de 1940 y su operación entre los años 1952-1953 con dos unidades pequeñas.

Fusión en baño

En la década de 1960 surgen las tecnologías de fusión en baño en competencia con aquellas por suspensión o autógenas. Los primeros en investigar al respecto fueron la empresa Noranda de Canadá, creando e instalando el reactor del mismo nombre en la fundición de Horne en 1973. El reactor, con forma de cilindro horizontal basculante, era equipado con toberas de inyección de gas de reacción localizadas entre la boca de carga y la boca de salida de gases, y la carga de concentrado era alimentada sobre el baño fundido.

Posterior a la tecnología Noranda, y buscando incrementar aún más la eficiencia del proceso, la Fundición Caletón de Codelco crea el CT, entre los años 1974-1976, como una alternativa intermedia entre la fusión convencional y la fusión autógena. Fue desarrollado por el fracaso de la tecnología "oxygen-smelting" para fundir concentrado en convertidores, debido a dificultades en el balance de calor y arrastre de concentrado en los gases. La idea innovadora principal fue usar el calor de conversión de mata para fundir concentrado en un convertidor convencional modificado. En consecuencia, un convertidor convencional se alargó, se reposicionó la boca de salida de gases y se ubicaron las toberas en forma opuesta a dicha boca, para dar lugar a las pruebas piloto de fusión.

Como productos se obtienen metal blanco de ley 72-75 % Cu y escoria cercana a la saturación con magnetita con contenidos de cobre entre 6 y 8 %. El metal blanco se envía a convertidores convencionales y la escoria, a hornos de limpieza. El reactor mantiene la posibilidad de llegar a operación autógena a través del enriquecimiento del aire, dependiendo del tipo de concentrado. En la actualidad, su gran diferencia respecto a otros equipos de fusión en baño radica en la inyección de concentrado seco al baño fundido, de forma neumática a través de toberas.

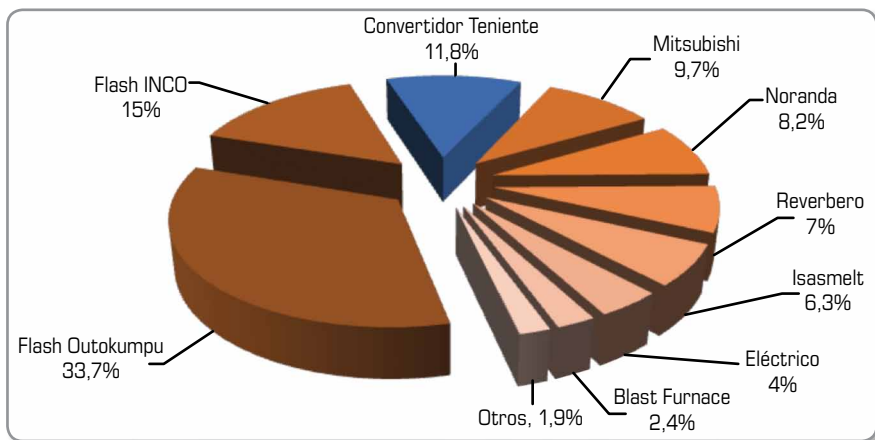
También en la década de 1960, aunque con altas inversiones, comenzaron las tendencias operacionales continuas en baño. Es así que en Japón se crea la tecnología Mitsubishi, que considera desde la fusión de con-

centrado hasta la generación de blíster en tres reactores en línea: fusión, limpieza de escoria y conversión. Los reactores son de diseño circular. El horno de fusión considera la inyección de concentrado y de aire enriquecido con oxígeno a través de lanzas verticales sobre la superficie del baño fundido. La mata y la escoria del horno circulan de manera continua a través de una canaleta al horno de limpieza de escoria, y, posteriormente, la mata separada en este horno fluye a través de otra canaleta al reactor de conversión.

Por su parte, en Australia se crea la tecnología Isasmelt cuyos inicios se reportan en el año 1987 con una planta piloto. A la fecha se encuentran instalaciones operando en Australia, EE. UU., Bélgica, Zambia, Indonesia y Perú.

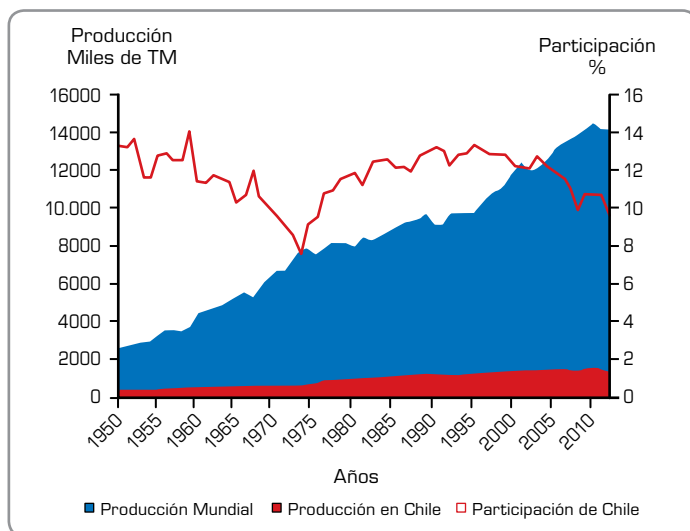
Con posterioridad a la realización de la Conferencia Copper 2003, J. Kapusta [Kapusta, 2004] publicó los resultados de un *benchmarking* acerca de equipos y capacidades de las principales fundiciones de cobre del mundo. En ese análisis se constató que la fusión en baño alcanza a 36 % de la producción mundial de cobre de fundición, en tanto que otras tecnologías producen el 64 % restante.

Con la finalidad de mostrar la importancia del CT, en la distribución de capacidades de fusión, analizadas el año 2004, se presenta el gráfico siguiente:



Pirometalurgia del cobre en Chile

En el año 2012, Chile fue responsable de aproximadamente el 9,5 % de la producción pirometalúrgica de cobre en el mundo, lo que representa cerca de 1.342,4 miles de TM en cobre fino y lo sitúa en el tercer lugar, detrás de China (19,9 %, 2.826 miles de TM) y Japón (11,3 %, 1.608,8 miles de TM), respectivamente. La figura adjunta muestra la producción mundial de cobre de fundición, así como aquella de Chile y su correspondiente participación desde el año 1950 al 2012.



La actividad industrial pirometalúrgica del cobre comienza con Codelco en el año 1922 y la fundición Caletónes de la División el Teniente; cinco años más tarde se abre Potrerillos de la División el Salvador; en el año 1952 se suman la fundición Chuquicamata de su correspondiente división y la fundición Hernán Videla Lira (Paipote) perteneciente a Enami. En 1960 empieza sus actividades la fundición Chagres, siendo la primera de financiamiento privado; posteriormente, Ventanas que, en sus inicios en 1964, fue propiedad de Enami y posteriormente pasó a manos de Codelco en el 2005, y finalmente la fundición Altonorte, también de accionistas privados.

Actualmente, y de acuerdo a lo anterior, la responsabilidad de la producción de cobre metálico a partir de concentrados sulfurados recae sobre siete fundiciones, de las cuales cinco son estatales (cuatro de Codelco y una de Enami) y dos privadas. Tres de las siete fundiciones cuentan con electrorrefinerías, siendo entonces capaces de producir cátodos de cobre, y en su conjunto con las otras fundiciones, también producir productos intermedios, como cobre blíster y cobre anódico.

Chuquicamata y Caletónes se encuentran entre las cinco fundiciones de cobre con mayor producción en el mundo y, en términos generales, Codelco resulta ser la empresa con mayor producción pirometalúrgica en el mundo, sumando sus cuatro fundiciones.

En Chile existen tres tipos de reactores utilizados para la fusión de concentrado: Convertidor Teniente (CT), horno Flash Outokumpu (FO) y reactor Continuo Noranda (RCN), y solo una tecnología de conversión, que corresponde al reactor basculante Peirce Smith (CPS). En la fusión, la tecnología CT es mayoritaria, con seis unidades, siendo la mayor de ellas de 23 metros de largo y 5 metros de diámetro, que pertenece a la fundi-

ción Chuquicamata; operan solo dos reactores FO, uno en Chuquicamata y el otro en Chagres, y un RCN, en la fundición Altonorte.

La tabla que se presenta a continuación resume la información al 2012 de la configuración con que operan las siete fundiciones de cobre ubicadas en Chile, abordando las operaciones unitarias de fusión, conversión y refinado a fuego, así como algunas operaciones auxiliares de limpieza de escorias y moldeo, e indicando en cada etapa los equipos correspondientes. Además, se mencionan las dimensiones de los reactores de fusión cilíndricos, CT y RCN, así como sus capacidades de tratamiento.

OPERACIÓN UNITARIA	CODELCO	GLENCORE	CODELCO	ENAMI	CODELCO	AAS(1)	CODELCO
	Chuquicamata	Altonorte	Potrillo	Paipote	Ventanas	Chagres	Caletones
AÑO DE INICIO	1952	1993	1927	1952	1964	1960	1922
FUSIÓN	1 CT + (1 FO)	RCN	1 CT	1 CT	1 CT	1 FO	2 CT
TAMAÑO, L x f (m)	23 x 5	26,4 x 5,3	22 x 5	14,9 x 3,8	14 x 5	-	22 x 5
CAPACIDAD							
diseño (TPD)	2.500 (2.400)	-	2.200	-	1.200	-	2.600
nominal (TPD)	2.200 (2.650)	2.800	2.000	1.050	1.400	1.890	2.300
anual (TPA)	748.000 (852.000)	950.000	680.000	320.000	400.000	600.000	1.378.000
CONVERSIÓN	4 CPS	3 CPS	3 CPS	1 CPS	3 CPS	4 CPS	4 CPS
REFINO A FUEGO	6 A + 2 SC	3 A	2 A	1 A	1 A + 2 R	2 A	5 A
LIMPIEZA DE ESCORIA	1 HELE + 1 HLE	Flotación	3 HLE	1 HELE	1 HELE	1 HLE	4 HLE
RUEDAS DE MOLDEO	3 Out	2 Out	2 Demag	1 Out	1 Walker	1 Out	2 Out

(1) AAS: Anglo American Sur

CPS: Convertidor Peirce Smith

SC: Horno Scrap

FO: Horno Flash Outokumpu

A: Horno Anódico

HELE: Horno Eléc. de Limpieza de Escorias

RCN: Reactor Continuo Noranda

R: Horno Reverbero

HLE: Horno de Limpieza de Escorias

Historia del Convertidor Teniente

Un hito en el desarrollo tecnológico nacional

Uno de los principales hitos en el desarrollo tecnológico de la minería nacional lo constituye el Convertidor Teniente, innovación surgida del ingenio y esfuerzo de profesionales chilenos, en la década de 1970. Las investigaciones iniciadas en la División El Teniente de Codelco Chile dieron como resultado un reactor pirometalúrgico capaz de fundir y convertir concentrado de cobre a metal blanco, en un único equipo y sin aporte de energía externa.

El rol de Hermann Schwarze y Johann von Loebenstein

Esta relevante innovación técnica fue liderada y llevada adelante por el ingeniero de minas Don Hermann Schwarze, quien junto a un grupo de

ingenieros de la Fundición Caletones, fue el responsable de la creación de este nuevo tipo de horno de conversión continua.

Varios factores del entorno país pusieron el marco contingente para este desarrollo: la reciente nacionalización del cobre, un ambicioso plan de aumento de producción y el alto precio del petróleo que hacía de los hornos reverberos un equipamiento no económico, ya que requerían quemadores de petróleo/aire enriquecido, de muy alto costo de operación debido a la ineficiencia térmica del horno.

En las pruebas de investigación acerca del funcionamiento del nuevo concepto de fusión, colaboró Johann von Loebenstein, quien en 1972 regaló un pequeño convertidor de la Fundición Chagres, el que fue modificado adicionándosele toberas para inyección de concentrado bajo baño junto a las toberas de inyección de aire para que se realizaran algunas pruebas a escala piloto, previas a las pruebas industriales.

Convertidor modificado tipo Teniente (CMT)

Entre septiembre y diciembre de 1976 se modificó un convertidor tradicional, de acuerdo a los resultados obtenidos en la fase de investigación, sin autorización formal y con pocos recursos financieros frescos disponibles. El equipo de innovación de ese entonces enfrentó varios desafíos: si la idea no funcionaba, era mejor tener una buena explicación por lo realizado sin autorización formal, ya que aun cuando la inversión era baja, requería de justificación.

El primer CMT, "Convertidor Modificado tipo Teniente", como se lo llamó inicialmente, también conocido como "tarro" en el lenguaje coloquial, inició sus funciones en 1977 con excelentes resultados. Así, empezó oficialmente la manufactura del segundo y oficial CMT, pero nunca con el objetivo de comercializar la patente, sino con la finalidad puntual de solucionar los problemas técnicos inmediatos de Caletones.

El primer CT fue dispuesto en forma inclinada para ayudar a la separación de las fases metal y escoria. Luego, pasó a la disposición horizontal, con la que opera hoy en día. Experimentalmente se demostró que era posible mantener la temperatura constante, lo que favorecía la vida útil de su revestimiento refractario, vislumbrándose entonces como solución técnicamente eficiente y de menores costos que los hornos reverberos.

El CT, una tecnología de exportación

Según entrevista realizada a Hermann Schwarze, *"fue un período que, en distintos países, hubo muchas modificaciones tecnológicas en fundiciones de cobre"*. Sin embargo, por esos años, Chile se encontraba en una situación política compleja para acceder a nuevas tecnologías. Tras múltiples pruebas y experiencias industriales, en 1976 se decidió retirar dos antiguos

convertidores de la Fundición Caletones para ser remplazados por esta nueva solución innovadora.

El 10 de enero de 1977 se cargó el convertidor modificado para conversión continua. La primera campaña alcanzó una fusión de 464 ton/día de concentrado y 515 ton/día de eje de reverberos. Desde entonces, el Convertidor Teniente ha sido utilizado con éxito en las fundiciones de Codelco y Enami, en Chile, y en países como México, Perú, Zambia y Tailandia.

Un mensaje para las nuevas generaciones

En palabras del propio Hermann Schwarze, para concretar el CMT *“fue necesario mucho ingenio y audacia, además de una casi nula aversión al riesgo”*. Cuando en una entrevista para la edición 106 de la extinta revista *Informativo* del Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, le fue solicitado un mensaje para las nuevas generaciones, Schwarze tuvo solo palabras de estímulos: *“Nunca dejen de estudiar, deben estar al día en el avance tecnológico y en las teorías de vanguardia. (...) No deben tener miedo de plantear soluciones nuevas”*, concluyó.

Etapas de desarrollo del Convertidor Teniente

La necesidad de una innovación

Bajo la necesidad de aumentar significativamente la producción de cobre, en un contexto político difícil, con precios de los combustibles en aumento y el severo riesgo de obsolescencia tecnológica, en Fundición Caletones se dio inicio a un plan tecnológico destinado a conseguir mayores niveles de fusión de concentrado en un Convertidor Peirce Smith [Schwarze, 2003; Bobadilla, 2006]. Sin embargo, las pruebas industriales no fueron satisfactorias, por lo cual se decidió realizar experiencias piloto, producto de las cuales se dio origen al CMT, capaz de fundir concentrado de cobre y convertir hasta nivel de metal blanco, cumpliendo con el aumento de capacidad de fusión y disminución del consumo de combustible. El 10 de enero de 1977 se dio comienzo a la operación del primer CT, de 4 m de diámetro por 16 m de longitud, con una disposición horizontal de operación en la Fundición Caletones.

Principales obstáculos

Antes de llegar a este hito histórico para la ingeniería chilena, los esfuerzos de innovación necesarios pasaron por las mismas dificultades que hoy enfrenta cualquier proceso de innovación en Chile, esto es, la precariedad de recursos financieros, que es suplida con alta capacidad de compromiso e ingenio de parte de los investigadores; las barreras burocráticas, que a menudo llevan a disfrazar la investigación como parte

de un proyecto mayor, y la escasa cultura de innovación, que conduce a focalizar todo tipo de recursos hacia la producción, evitando la mirada de futuro y los riesgos de pérdida de valor tecnológico y competitividad de equipos y procesos. Hermann Schwarze y su equipo de ingenieros realizaron sus experiencias alejados de las operaciones normales, con dificultades para explicar los costos en que se estaba incurriendo, aun cuando oficialmente existía un grupo de I&D.

Principales hitos técnicos

El producto del esfuerzo de ese equipo de trabajo y de quienes lo han seguido ha marcado los siguientes hitos de desarrollo del Convertidor Teniente y la tecnología CT, que considera la limpieza pirometalúrgica de la escoria para recuperar cobre desde ellas.

- 1974** Se construye la planta piloto para el desarrollo de una tecnología de fusión-conversión continua y se practicaba en un Convertidor Peirce Smith. En las fundiciones chilenas, la fusión de concentrado se realiza principalmente en hornos reverberos.
- 1974 a 1976** Es el período de desarrollo de ensayos piloto, realizados en la Fundición Caletones.
- 1977** El día 10 de enero de 1977 comienza la operación del primer CMT, el que se dispone horizontalmente, de 4 m de diámetro por 16 m de longitud.
- 1977** En forma paralela, en los hornos reverberos se aplica enriquecimiento de oxígeno en los quemadores, permitiendo aumentar la tasa de fusión, aun si son energéticamente ineficientes.
- 1978** En el mes de abril se comisiona el segundo CT, en la Fundición Caletones, de 4 m de diámetro por 17 m de longitud. Ambos CMT son capaces de fundir 500 ton/día de concentrado húmedo y 300 ton/día de eje de reverbero.
- 1984** A partir de 1984 se realizan ensayos piloto de inyección de concentrado seco por toberas. Este mismo año se comisiona un CT de 4 m x 18 m en la Fundición Chuquicamata y un CT de 4 m x 15 m en Enami Ventanas, siendo este el primer CT transferido fuera de Codelco.
- 1985** Es comisionado a Fundición Potrerillos un CT de 4 m x 18 m.
- 1987** Entra en práctica industrial la inyección de concentrado por toberas.
- 1987** En Fundición Caletones, un CT de 4 m x 18 m es remplazado por uno más grande de 5 m x 22 m.
- 1988** El CT de 5 m x 22 m es alimentado con concentrado seco inyectado por toberas.

- 1989** El segundo CT de Fundición Caletones es remplazado por un CT de 5 m x 22 m.
- 1991** En Fundición Chuquicamata, un CT de 4 m x 18 m es remplazado por un CT de 5 m x 23 m.
- 1991** En Fundición Caletones se consigue la fusión 100 % autógena.
- 1993** En Fundición Chuquicamata se remplaza un segundo CT, de 4 m x 18 m, por un CT de 5 m x 23 m.
- 1993** Se realiza inyección de concentrado por toberas, en ambos CT.
- 1993** Un CT de 3,8 m x 14,9 m es comisionado a Fundición Hernán Videla Lira, de Enami.
- 1998** Tanto en Fundición Ventanas como en Fundición Hernán Videla Lira, ambas de Enami, sus respectivos CT se convierten en las únicas unidades de fusión de concentrado.
- 2001** Se realiza un completo análisis fluido-dinámico del CT, aplicando modelos físicos y matemáticos en el IM2, filial de Codelco Chile.
- 2001** Aplicación de análisis fluido-dinámico, ciencia de materiales y matemáticas avanzadas, para determinar la máxima capacidad de producción del CT mediante un proyecto financiado por Codelco Chile y Fondef, a través de IM2 y el CMM de la Universidad de Chile [Conca *et al.* (a), (b) 2003, San Martín *et al.*, 2006].
- 2003** Inyección de concentrado seco en fase densa en la Fundición de Chuquicamata.
- 2003** Investigación y desarrollo del proceso de conversión continua en el CT de la Fundición Chuquicamata.

Hitos técnico-comerciales

Junto a los anteriores hitos técnicos es importante considerar los hitos técnico-comerciales conseguidos por Codelco Chile, que se enumeran a continuación.

1994 Un CT es exportado a Fundición Nkana, de Zambia.

1995 Un CT es exportado a Fundición Ilo, de Perú.

1997 Un CT es exportado a Fundición La Caridad, de México.

1998 Un CT es exportado a Fundición Rayong, de Tailandia.

En la actualidad, los CT alcanzan tasas de fusión de concentrado de 2.500 ton/día como valor medio, llegando a 3.000-3.200 ton sólidos/día usando aire enriquecido, con campañas operacionales de dos años.

Convertidores Teniente en el Mundo

Luego de la exitosa puesta en operación del CT en la Fundición Caletones, de Codelco Chile, comenzó su expansión en fundiciones chilenas. Así, en 1984 ya operaban dos CT en Caletones y se hacía una transferencia tecnológica a la Fundición Chuquicamata y un CT a la Fundición Ventanas, de Enami.

El primer CT exportado al extranjero es el CT de la Fundición Nkana, de Zambia. Sus dimensiones alcanzan a 4,5 m de diámetro y 18,5 m de longitud. Se encuentra operativo [Syamujulu, 2005]. Este reactor usa inyección de concentrado por toberas y su condición de diseño considera tratar 500 ton/día de concentrado en Nchanga, usando 1.244 ton de eje de reverbero. En la actualidad, opera con diferentes mezclas de concentrados y carga fría.

Catastro de los convertidores Teniente

Fundición Chuquicamata: Cuenta con dos unidades CT. Solo uno, denominado CT2, opera actualmente en conjunto con el horno Flash Outokumpu; el CT1 fue dado de baja.

Fundición Caletones: Opera con dos CT.

Fundición Potrerillos: Opera con un CT.

Fundición y Refinería Ventanas: Opera con un CT.

Fundición Hernán Videla Lira: Opera con un CT.

Fundición Nkana (Zambia): Opera con un CT.

Fundición Ilo (Perú): El complejo de fusión reverbero-CT fue sustituido por un horno Isasmelt, con capacidad de fusión 1.200.000 ton sólidos/año [Mariscal *et al.*, 2007].

Fundición La Caridad (México): Opera con un CT.

Fundición Rayong (Tailandia): Opera con un CT.

El CT exportado a la Fundición de Ilo, 1995, en Perú, de 4,5 m de diámetro y 20 m de longitud, operó con alimentación líquida desde un horno de reverbero. Su capacidad de diseño consideró la fusión de 774 ton/día de concentrado, la que fue rápidamente superada, alcanzando a 1.186 ton/día de concentrado, más 220 ton/día de material frío [Fernández, 2001]. Debido a restricciones ambientales, necesidad de aumento de capacidad de fusión y análisis económico, la fundición de Ilo optó por la tecnología Isasmelt en el año 2007, dejando de operar el CT.

El CT de Fundición La Caridad, de México, de 4,5 m de diámetro y 20,8 m de longitud, es capaz de fundir 1.450 ton/día de concentrado, produciendo un metal blanco de 72 a 75 % de ley de cobre [Puente *et al.*, 2006].

El CT de Rayong, Tailandia, se encuentra operativo [Kapusta, 2004], con una capacidad nominal de 78 ton/hora de fusión de concentrado, lo que le permite producir 180.000 ton/año de cobre.

Fenómenos de transporte asociados al Convertidor Teniente

Generalidades

Los fenómenos de transporte constituyen una ciencia del ingeniero, destinada a estudiar en forma sintética y uniformada la transferencia de cantidad de movimiento, de energía térmica y de masa. Esta disciplina nació en los años 50 y se desarrolló grandemente en los 60, enfocada mayormente en la ingeniería química en EE. UU. [Bird *et al.*, 1960] y en Francia [Craya, 1960]. A fines de los 60 empiezan, en EE. UU. y Canadá, desarrollos de investigación en fenómenos de transferencia en metalurgia [Szekely & Themelis, 1971; Geiger & Poirier, 1973]. En esa época comienzan, asimismo, estas actividades en Chile.

Primeras investigaciones en Chile

A fines de los 60 y comienzos de los 70 se realizan, como tesis en la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile, modelos químicos y termodinámicos del Convertidor Peirce Smith (CPS) [Andalaf 1968, Hoefele 1974].

En 1973, en el Centro de Investigaciones Mineras y Metalúrgicas (CIMM) se realiza un estudio dinámico y térmico destinado a determinar la capacidad máxima de la chimenea de la fundición de Chuquicamata. Este estudio teórico, apoyado por medidas de campo, plausiblemente es el primero en su género a nivel mundial [Rayo *et al.*, 1973]. Esta línea se prolongó después mediante un estudio teórico experimental en laboratorio [Soto *et al.*, 1992].

En el mismo año se realiza un estudio de presiones y velocidades en un modelo reducido hidráulico del CPS [Puchi *et al.*, 1973]. Este estudio pionero queda inconcluso. Asimismo, en Rancagua, Hermann Schwarze propone informalmente efectuar una cámara refrigerada en amianto para llevar a cabo mediciones al interior de un CPS. Esta idea no pudo materializarse.

Ya a fines de la década de 1970 y comienzos de los años 80 se realizan en el CIMM modelos unifilares cuasiestáticos del CPS y del CT [Luraschi *et al.*, Informe reservado].

Investigaciones recientes

En los años 90 se efectúan nuevamente modelos físicos del CPS y del CT a diferentes escalas y empleando diferentes líquidos y materiales particulados en el CIMM y en el IM2 [Devia *et al.*, 1995, Rosales *et al.*, 1999].

Asimismo se desarrollan simulaciones numéricas asociadas al CPS y al CT:

- Modelo unifilar dinámico y térmico de Ashman generalizado [Fuentes *et al.*, 1993].
- Dinámica de burbujas aisladas en convertidores [San Martín *et al.*, 1998] y de trenes de burbujas [Valencia *et al.*, 2004].
- El impacto de chorros gaseosos en baños fundidos asociado al CT se estudia tanto matemáticamente como mediante modelos físicos [Salinas *et al.*, 1999].

Dentro de este plan se realizan estudios de optimización de la caldera recuperadora de calor del horno Flash de Chuquicamata en modelo físico. Los métodos para medir velocidades son estrictamente originales y se patentan para Codelco [Ruz *et al.*, 2003].

Se efectúan estudios del oleaje al interior del CT. El estudio comportó una serie de desarrollos teóricos y trabajos experimentales, incluyendo estabilidad de interfaces [Rosales *et al.*, 2010].

En la línea de la magneto-hidrodinámica se desarrollan modelos teóricos y experimentales aplicados a la pirometalurgia de las escorias [Alvarez *et al.*, 2003]. En el campo de la dinámica de interfaces a alta temperatura se estudia, por simulación numérica, el arrastre de metal blanco en el vaciado del CT.

Un estudio industrial de alto impacto es el que se lleva a cabo por simulación numérica 3D del enfriamiento de ollas, revestidas o no, conteniendo metal fundido [Ruz *et al.*, 1999].

En la década del 2000 se siguen realizando estudios matemáticos 1D y 2D, así como ensayos en modelos hidráulicos para determinar la dinámica de la inyección en el CT [Conca *et al.*, (a), (b) 2003]. Estos trabajos extienden grandemente y amplían los realizados en los años 70, dando pábulo a un proyecto más completo y sintético.

Fortalezas y debilidades del Convertidor Teniente

En su “Visión Futura Convertidor Teniente Caletones” [Bobadilla, 2006] destaca las fortalezas del CT, mirado desde la fundición que dio origen a esta relevante innovación industrial nacional, que dado lo certero de su diagnóstico, es citado y comentado a continuación, junto con ampliar sus reflexiones.

La operación del CT presenta fortalezas destacables, reconocidas por sus operadores [Bobadilla, 2006; Puente *et al.*, 2006], de las cuales cabe destacar:

1. **Flexibilidad operacional**, siendo esta capacidad la que mayor reconocimiento presenta debido a que:
 - a) Opera con una amplia gama de calidades de concentrado, incluso en la Fundición de Nkana [Syamujulu, 2005], donde el concentrado es de baja concentración de pirita, lo que ciertamente es una dificultad para lograr la condición de fusión autógena.

- b) Cierra el balance de calor con alimentación de carga fría por “Garr-Gun”, lo cual otorga flexibilidad operacional al total de la operación de la fundición, ya que es posible fundir fondos de ollas, restos cobrizados de limpieza de canales u otros materiales cobrizados provenientes de operaciones aguas abajo. Por otra parte, en aquellos casos en que los concentrados que se van a procesar presenten baja capacidad calórica es posible alimentar carbón junto con los fundentes, para, de este modo, aportar el calor necesario.
 - c) Adapta la capacidad de fusión en relación con el número de toberas operativas. Si hubiese toberas obstruidas, el soplado de aire enriquecido se mantiene distribuido en las toberas operativas, de tal modo que los programas de producción diaria se mantienen.
 - d) Una vez que se alcanza el régimen de operación, su detención y su reanudación no revisten mayor complejidad. Incluso, es posible reparar o cambiar toberas obstruidas sin necesidad de apagar el reactor.
 - e) Alta conversión a metal, la que llega a valores de 72 a 75 % de cobre, contenido en la fase metal blanco, lo que facilita la siguiente operación de soplado a cobre.
 - f) Si el equipo falla en una condición extrema, la solución es rápida.
 - g) Las campañas de operación superan los 18 meses, alcanzando en algunos casos sobre 24 meses de operación.
2. **Balance de arsénico.** Alrededor del 80 % del As alimentado lo envía a planta de limpieza de gases, lo cual es relevante en el caso de concentrados con contenidos de As cercanos al 1 %.
 3. **Balance de calor.** La operación del CT favorece el balance de calor al permitir el 100 % de alimentación de concentrado seco (0,2 % de humedad).
 4. **Producción de metal blanco.** En solo una etapa produce metal blanco de 72 % Cu, con 3-4 % Fe y 21-23 % S, el que es un producto intermedio, que granulado o granallado, puede ser considerado un *commodity*, dadas sus características físicas y químicas y facilidad de transporte.
 5. **Carga fría.** Puede fundir prácticamente todo tipo de carga fría, con lo cual permite cerrar el balance de material secundario de la fundición, incluso con holguras para permitir el tratamiento de carga fría externa.
 6. **Generación de polvo.** El factor de generación de polvo es igual o inferior a 0,5 % con respecto a la carga sólida alimentada.
 7. **Curva de aprendizaje.** La así llamada curva de aprendizaje de operación es rápida y segura.

Sin embargo, también es posible identificar debilidades:

1. **Operaciones manuales**, tales como abrir y cerrar pasajes, con eventual punzado de toberas.
2. **Alta variabilidad del flujo de soplado.**

3. **Gases fugitivos** en campana y pasajes de sangría.
4. **Mediciones imprecisas.** Medición de nivel de fases discontinua y manual generando mediciones imprecisas.
5. **Oxígeno limitado.** El enriquecimiento de oxígeno en el aire de soplado se limita a un máximo de 40 %.
6. **Presión en toberas.** Uso de toberas de soplado con baja presión, menor o igual a 20 psi, lo que lleva a una baja vida útil de la línea de toberas.
7. **Pérdidas térmicas.** Los gases calientes emitidos por boca no se aprovechan para recuperar calor.
8. **Puesta en marcha.** Si no se dispone de eje o metal blanco semilla, la puesta en marcha es de largo tiempo.
9. **Escoria con altos niveles de cobre.**

Tanto las fortalezas, y con mayor razón sus debilidades, dejan campo abierto a desafíos de desarrollo e innovaciones tecnológicas que permitan enfrentar su sustentabilidad ambiental y si Codelco desea exportar esta tecnología, como lo hizo en el pasado [Schwarze *et al.*, 2003], las nuevas tecnologías de fusión ya posicionadas [Arthur *et al.*, 2005] y las emergentes [Cui *et al.*, 2003] constituyen severos desafíos por superar.

Desafíos futuros

Ya en su artículo [Bobadilla, 2006], el autor realiza un certero diagnóstico de los desafíos futuros, ya actuales, que además de destacar lo planteado por este autor, consideraremos aspectos que han surgido en forma reciente, o bien que debido a los desarrollos tecnológicos alcanzados en el ámbito de la fusión de minerales, pueden aportar a las necesarias soluciones a problemas de ayer y de hoy.

En la referencia antes citada, se señala:

1. Mejorar productividad del equipo.
2. Reducir las emisiones al medio ambiente.
3. Reducir costos de operación.

Si se trata de mejorar la producción local, concordamos con lo planteado por Bobadilla, y consideramos pertinente, además:

4. Mejorar la capacitación continua de los operadores.
5. Mejorar la gestión energética del CT [Martínez, 2003].
6. Mejorar los niveles de automatización.
7. Innovar en procesos de conversión continua [Warczok *et al.*, 2003].

Políticas de desarrollo

Estos factores requieren una decidida política de desarrollo tecnológico, considerando lo estratégico que resulta hoy mantener capacidad de producción de cobre metálico, a menos que se entregue el control del

mercado completamente a alguna potencia económica extranjera [Ruz *et al.*, 2012].

Tal política de desarrollo es del todo factible, ya que las tecnologías, que permitirían mejorar en los factores ya señalados se encuentran vigentes y operando en las mejores fundiciones del mundo; por ejemplo, en China y Japón [Ruz *et al.*, 2012].

Una revisión crítica del actual diseño del CT es necesaria para lograr identificar, mediante análisis fluidodinámico y de ciencias de los materiales, cuáles son los puntos o zonas de mayor impacto en el control energético del CT.

Se requiere desarrollo técnico que permita inyectar, ya sea por toberas o lanzas complementarias, la mezcla de carga fría y fundente. La inyección de aire enriquecido a niveles por sobre el 40 % se vería favorecida por la inyección a alta presión, como ha sido ya planteado en numerosos trabajos de investigación teórica y práctica. Para las operaciones manuales de sangrado y taponado de sangrías de metal blanco y escoria, es necesario desarrollar e implantar soluciones robóticas, dado lo riesgoso de las operaciones manuales.

Las emisiones secundarias son posibles de ser captadas y tratadas con nuevas tecnologías de tratamiento de gases de baja concentración de SO_2 [Ruz *et al.*, 2012; Fagerlund, 2013]. La instalación de una caldera recuperadora de calor en la zona superior de la boca del CT es técnicamente factible.

Si se trata de comercializar el CT, hoy en día resulta más difícil que en los años 80, en que el CT fue exportado a México, Perú, Zambia y Tailandia. A este respecto, las tecnologías de fusión *flash* han resultado mejores desde el punto de vista de control de las emisiones al medio ambiente, por lo cual la potencial exportación debe superar la condición actual mediante diseño, análisis y adecuada secuencia de proyectos de ingeniería que permitan materializar un convertidor de clase mundial.

Los esfuerzos técnicos deben ir acompañados de una adecuada gestión comercial, que considere e incluya los desarrollos de control computacional avanzado que se ha logrado en las fundiciones de Codelco Chile, como parte del paquete tecnológico que competirá con tecnologías probadas y con la emergente tecnología china Bottom Blown Converter [Cui *et al.*, 2003], que es producto de una innovación tecnológica privada.

Reflexiones finales

Hasta ahora, el cobre ha constituido nuestra principal fuente de inserción con la economía mundial. Pero hoy en día necesitamos ir más allá, y lograr empatía con una pregunta transversal a la sociedad chilena: ¿cuál es la estrategia que debemos seguir para alcanzar la meta de ser un país desarrollado?

Distintos enfoques

Abundante evidencia internacional muestra que esto no es cuestión de un alto nivel de ingresos per cápita (ejemplos emblemáticos son Dubái, Qatar, EE. AA., Kuwait). Por otro lado, a una parte de la sociedad le cabe el convencimiento de que Chile no será verdaderamente desarrollado hasta cuando produzca alta tecnología (equipos electrónicos, equipamiento para la gran minería, *software* o tecnología aeroespacial), y surja alguna empresa equivalente (en innovación y emprendimiento) a Nokia, Outokumpu, Apple, Avions Marcel Dassault-Bréguet Aviation o Google. Por supuesto, hay también quienes, reduccionistamente, piensan que un crecimiento económico sostenido es suficiente para lograr este anhelo del desarrollo.

El cobre, una oportunidad de desarrollo tecnológico

Según se informa en el Anuario de Estadísticas de Cochilco⁵ 1993-2012 (Tabla 13.2), las exportaciones chilenas de concentrado de cobre alcanzan en promedio alrededor del 40 % del total del mineral exportado (son concentrados con un contenido del orden de 30 a 45 % de cobre puro), y que es principalmente Codelco (empresas nacionales) el que refina concentrado y exporta cátodos o cobre refinado (99,99 % de cobre puro). No es suficiente exportar más. Debemos exportar productos de mejor calidad, y “agregar inteligencia a las piedras (de cobre) que Chile exporta” [Valenzuela, 1993]. Cuando se ha propuesto ampliar la contribución del cobre al desarrollo del país, se ha pensado en integración vertical [Meller, 2002], vale decir, en llegar con producción más allá de concentrado de cobre, incluyendo su refinación y ojalá la producción de manufacturas de cobre.

La producción chilena de cobre tiene el potencial para desarrollar un proceso continuo y múltiple de innovación tecnológica. Recordemos que la innovación tecnológica es la base para aumentar la productividad, fortalecer la formación de ingenieros y técnicos en ciencias de la ingeniería, y llegar a ser un país desarrollado.

Recomendaciones

Los países más exitosos han hecho esfuerzos colaborativos entre empresas, gobierno y universidades para promover la innovación, investigación y desarrollo en el sector. Una de las deficiencias del sistema de I&D en Chile es que invierte una cantidad insuficiente de recursos, y que estos provienen principalmente del sector público (la inversión privada en I&D en Chile es muy baja), canalizados a las universidades. Ello genera un riesgo alto de desconexión entre la investigación y las necesidades del sector productivo. Por lo antes mencionado, el trabajo colaborativo

5 Comisión Chilena del Cobre.

entre empresas y universidades resulta indispensable, sin mencionar la complejidad de los problemas tecnológicos ni la rápida evolución de los cambios en el mundo de la cultura tecnológica.

Literatura citada

- A. ÁLVAREZ, L. F. MUJICA y R. FUENTES. *MHD stirring of copper slags*. en Actas del Congreso Internacional Copper'03, Santiago, Chile, 2003.
- N. ANDALRAFT. *Modelo matemático de la conversión de cobre*. Memoria para optar al título de Ingeniero de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 1968.
- P. S. ARTHUR y S. P. HUNT. *IsasmeltTM-25 years of continuous evolution*. En Actas del John Floyd International Symposium on Sustainable Developments in Metals Processing, 2005.
- R. B. BIRD, W. E. STEWART y E. N. LIGHTFOOT. *Transport Phenomena*. Ed. John Wiley, 1960.
- J. BOBADILLA. *Visión futura del Convertidor Teniente-Fundición Caletones*. Informe Interno, 2006.
- C. CONCA, R. PAREDES, P. RUZ, R. FUENTES y M. CRUCHAGA. (a). *Numerical simulation of reverts smelting in a Teniente Converter*. Actas del Congreso Internacional Copper'03, Vol. IV (Book 2): Pyro-Metallurgy of Copper. Hermann Schwarze Symposium, C. Díaz *et al.*, eds. Santiago, Chile, 2003, pp. 251-261.
- C. CONCA, P. RUZ, R. FUENTES, R. PAREDES, M. ROSALES y A. BADILLO. (b). *Accretion growth in metallic fluid media*. Actas del Congreso Internacional Copper'03, Vol. IV (Book 2): Pyro-Metallurgy of Copper. Hermann Schwarze Symposium, C. Díaz *et al.*, eds. Santiago, Chile, 2003, pp. 499-513.
- A. CRAYA. *Phénomènes de transferts dans les fluides*. Notas de curso. Université Joseph Fourier, Grenoble, 1960.
- Z. CUI, Z. WANG y R. LI. *New development of bottom blown oxygen smelting technology in Dongying Fangyuan Nonferrous Metals Co. Ltd*, Abstract a presentar en el Congreso Internacional Copper'13.
- M. DEVIA, R. FUENTES y F. GUEVARA. *Gaseous Injection phenomenology in Peirce-Smith Converters*. En Actas del Congreso Internacional Copper'95. Santiago, Chile 1995.
- K. FAGERLUND. *Smelting-Integrated, sustainable plant solutions*. Abstract a presentar en el Congreso Internacional Copper'13.
- D. FERNÁNDEZ. *Incremento de la capacidad de fusión del Convertidor Teniente*. Presentación en Fundición de Ilo, Southern Perú, 2001.
- R. FUENTES, A. DEL CAMPO y J. ÁVILA. *Modelo de Ashman generalizado*. CIMM, 1993.
- G. H. GEIGER y D. R. POIRIER. *Transport Phenomena in Metallurgy*. Addison-Wesley Pub. Co, Reading, Mass, 1973.
- E. HOEFELE. *Factores que determinan la capacidad de fusión de concentrados de cobre en convertidores*. Memoria para optar al título de Ingeniero de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 1974.

- INSTITUTO DE INGENIEROS DE MINAS DE CHILE. *Revisión del enorme legado del fallecido Hermann Schwarze*. Noticias del Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2012.
- J. P. T. KAPUSTA. *JOM world nonferrous smelters survey*, Part I: Copper. JOM, Vol. 56, 2004, pp. 21-27.
- M. KING. *The evolution of technology for extractive metallurgy over the past 50 years-Is the best yet to come?* JOM, Vol. 59, 2007, pp. 21-27.
- L. MARISCAL y W. TORRES. *Modernization and start-up of the SPCC Ilo smelter*. En Actas del Congreso Internacional Copper'07, Vol. III: The Carlos Díaz Symposium on Pyrometallurgy, A. E. M. Warner *et al.*, eds., 2007, pp. 193-202.
- A. MARTÍNEZ. *Use of waste heat boilers to save resources*. Abstract a presentar en el Congreso Internacional Copper'13.
- P. MELLER. *Dilemas y Debates en torno al Cobre*. Dolmen Ediciones, 2002.
- N. PIZARRO. *Tecnología chilena para el mundo*. Minería Chilena n.º 286, abril 2005.
- F. PUCHI, C. LANDOLT y R. FUENTES. *Simulación física de la inyección gaseosa en un convertidor Peirce-Smith*. CIMM, 1973 (no publicado).
- J. A. PUENTE y C. R. REYNA. *Ten years of Teniente Converter operations*. En Actas del Teniente Converter Technology Workshop, 2006.
- J. RAYO, P. WELLMANN, E. HOEFELE, P. ATTANÉ y R. FUENTES. *Capacidad máxima de evacuación de gases de la chimenea de Chuquicamata*. CIMM, 1973.
- M. ROSALES, R. FUENTES, P. RUZ y J. GODOY. *A fluid dynamics simulation of a Teniente Converter*. En Actas del Congreso Internacional Copper'99, Phoenix, Arizona, USA, 1999.
- M. ROSALES, J. FONT y R. FUENTES. *A fluid-dynamics review of the Teniente Converter*. En Actas del Congreso Internacional Copper'10. Hambourg, Alemania, 2010.
- P. RUZ, J. AVÉROUS, M. ROSALES y R. FUENTES. *Numerical modelling of heat transfer in a smelter ladle, with and without a refractory lining*. En Actas del Congreso Internacional Copper'99. C. Díaz *et al.*, eds., The Minerals, Metals & Material Society, 1999.
- P. RUZ y J.C. TAPIA. *Desafíos para las ingenierías metalúrgica y de materiales en la creación de valor a partir de recursos mineros*. En Actas del Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales CONAMET/SAM, 2012.
- P. RUZ, H. JARA, L. SALINAS, M. ROSALES, M. CRUZ, A. MOYANO, N. PÉREZ y F. ROJAS. *Flow patterns in the waste heat boiler of Chuquicamata's Flash Furnace*. En Actas del Congreso Internacional Copper'03, Santiago, Chile, 2003.
- H. SCHWARZE, J. ACHURRA y C. DÍAZ. *Development of the El Teniente Converter Technology*. En Actas del Congreso Internacional Copper'03, Vol. IV Pyrometallurgy of Copper. C. Díaz *et al.*, eds., 2003, pp. 3-12.
- L. SALINAS y R. FUENTES. *Interaction between a gaseous vertical descending jet and a liquid surface-a theoretical and experimental study*. En Actas del Congreso Internacional Copper'99, Phoenix, Arizona, USA, 1999.
- J. SAN MARTÍN, R. GORMAZ, C. CONCA, F.-Z. SAOURI, A. BENADDI, R. FUENTES y P. RUZ. *Mathematical study of transport phenomena along a tuyere of the Teniente Converter*. Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2006, 12 pp.

- E. SOTO, R. FUENTES y J. AGUIRRE. *Modelo matemático para el cálculo de chimeneas*. En Actas del XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, 1992, pp. 383-393.
- M. SYAMUJULU. *A technical and operational audit of the first ten years of the Teniente Converter operations at Nkana Smelter*. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 105, 2005, pp. 627-640.
- J. SZEKELY. *The mathematical modeling revolution in extractive metallurgy*. Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 19, 1988, pp. 525-540.
- J. SZEKELY y N. J. THEMELIS. *Rate Phenomena in Process Metallurgy*. WileyInterscience, John Wiley, 1971.
- N. J. THEMELIS. *Pyrometallurgy near the end of the 20th Century*. JOM, Vol. 46, 1994, pp. 51-57.
- US GEOLOGICAL SURVEY. *Minerals commodity summaries and minerals*. Yearbook, 2012.
- A. VALENCIA, R. PAREDES, M. ROSALES, E. GODOY y J. ORTEGA. *Fluid dynamics of submerged gas injection into liquid in a model of copper converter*. International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 31, 2004, pp. 21-30.
- I. VALENZUELA, ed. *Chile Exporta Minería*. Editorial Antártica, 1993.
- A. WARCZOK, G. RIVEROS y L. VOISIN. *Phenomenology of copper matte continuous converting in a packed bed*. Abstract a presentar en el Congreso Internacional Copper'13.

ÁREA NANOTECNOLOGÍA

Desarrollo de envases plásticos con capacidad antimicrobiana para el envasado de salmón fresco

Miguel Kiwi (Coordinador),

Departamento de Física, Facultad de Ciencias,
Universidad de Chile.

María José Galotto,

Centro para el desarrollo de la nanociencia y la nanotecnología (Cedenna) y
Laboratorio de envases (Laben-Chile),
Depto. de ciencia y tecnología de alimentos, Facultad Tecnológica,
Universidad de Santiago de Chile.

Abel Guarda,

Centro para el desarrollo de la nanociencia y la nanotecnología (Cedenna) y
Laboratorio de envases (Laben-Chile),
Depto. de ciencia y tecnología de alimentos, Facultad Tecnológica,
Universidad de Santiago de Chile.

Resumen

El Gobierno de Chile tiene como meta posicionar a nuestro país como potencia agroalimentaria a nivel mundial. Si tenemos en consideración las distancias que nuestros alimentos tienen que recorrer para llegar a los mercados altamente exigentes, indudablemente necesitamos desarrollar materiales de envasado que nos permitan garantizar la calidad, inocuidad y la vida útil de nuestros alimentos.

La selección de un envase de alimento requiere una definición previa del mecanismo de deterioro que limita la vida útil. En el caso en estudio se planteó la posibilidad de incrementar la vida útil de salmón fresco refrigerado, limitada por el desarrollo microbiológico, el que se produce principalmente en la superficie del salmón. Se trabajó la hipótesis de incorporar en el material plástico un compuesto natural con propiedades

antimicrobianas que inhibiese el crecimiento de microorganismos. La nanotecnología es la herramienta utilizada para el desarrollo de un envase activo antimicrobiano, el que permitió incrementar la vida útil del salmón fresco refrigerado en aproximadamente 20 %, lo que permitirá a la industria salmonera llegar a mercados más alejados e incrementar sus exportaciones. Esta innovación fue financiada a través de un proyecto Fondef D06I1050 y el proyecto Basal Cedenna, con una inversión de aproximadamente M\$300.000 y un tiempo de desarrollo de alrededor de tres años. El desarrollo obtenido se encuentra en fase de patentamiento (n.º de solicitudes de patentes: 1342-2010 y 532-2011) y su aplicación será tanto en el mercado nacional como en el mercado internacional. A la fecha, este proyecto ha dado origen a otras iniciativas de aplicación de la nanotecnología en el desarrollo de envases activos de alimentos, y se está en fase de creación de un *spin-off* dentro de la universidad que nos permita una comercialización de los productos desarrollados hacia la industria transformadora de envases de alimentos.

PARTE I. Aspectos generales, nacionales e internacionales acerca de la innovación en envases activos de alimentos

Introducción

El Gobierno de Chile se ha puesto como objetivo prioritario posicionar al país como uno de los diez más importantes en la exportación de alimentos a nivel mundial. Indudablemente, este es un reto significativo, pues aunque en principio parezca fácil de alcanzar, ya que Chile dispone de una producción importante de alimentos (salmón, frutas, verduras, carnes blancas, entre otros), es una meta ambiciosa. Por ello, se debe dimensionar el reto que se plantea, pues por una parte posicionarse dentro de los principales países exportadores de alimentos significa superar a países que tienen una mayor proporción de tierra útil (Chile es un país angosto, principalmente minero, con una superficie cultivable limitada: al norte, a partir de la Tercera Región por el desierto, y por el sur, a partir de la Novena Región por una geografía desafiante y con un clima lluvioso y frío). Esto hace que se deba rentabilizar y optimizar el uso de las zonas cultivables. Por otra parte, al estar en el Cono Sur se puede aprovechar la contraestación para de este modo posicionar la producción de frutas y verduras en el hemisferio norte, en países con alto poder adquisitivo y ansiosos por productos frescos en época invernal, y además con capacidad para pagar un mayor costo por productos diferenciados y con características étnicas y de calidad.

Sin embargo, no se puede olvidar que Chile está alejado de los países destino de sus exportaciones, lo que implica que se deben desarrollar

sistemas de envases y embalajes que permitan que los productos lleguen en óptimo estado a los mercados internacionales que nos interesan particularmente, y que demandan alta calidad. Los productos deben llegar a estos mercados en condiciones de competir con los de otros países que tienen similares ventajas comparativas, pero que a menudo se encuentran más cercanos a los mercados destino (Nueva Zelanda, México, Perú, entre otros). El posicionar a Chile como potencia alimentaria requiere, entre otros elementos, contar con sistemas de última generación de envases y embalajes (E&E) capaces de asegurar la vida útil de los distintos productos para que alcancen destinos alejados de la calidad y de la inocuidad que dichos mercados exigen. El envase y el embalaje juegan por tanto un papel fundamental en este desafío.

El problema

Tradicionalmente, los envases para alimentos han sido concebidos como sistemas cuyo principal objetivo ha sido contener y proteger al alimento de los daños físicos inherentes al proceso de transporte y comercialización de los mismos. Sin embargo, esto desde hace un tiempo ha cambiado y actualmente el envase se concibe como un sistema alternativo de conservación de alimentos. Ya no se pide que el envase actúe como un simple contenedor, sino que se busca que, durante el tiempo en que está en contacto con el alimento, ejerza un efecto positivo y beneficioso sobre él. Ello da origen al concepto de *envase activo*.

El desarrollo de un envase activo, para un alimento específico, requiere de un conocimiento preciso de los principales mecanismos de deterioro que determinan la calidad y vida útil del alimento que se envasará. No basta con conocer los principales mecanismos de deterioro, sino se ha de conocer la cinética de dichas reacciones de deterioro para de este modo diseñar el envase más adecuado.

Uno de los factores que determinan la vida útil de muchos alimentos envasados es el crecimiento microbiológico, ya que es el desarrollo microbiano la causa principal de su deterioro, y es uno de los factores críticos que se deben resolver a la hora de buscar sistemas de envasado que permitan alargar la vida útil de los alimentos. Indudablemente, hasta la fecha se han desarrollado sistemas que, junto con sistemas compatibles de envasado (tratamientos térmicos, envasado aséptico, atmósfera modificada, envasado al vacío, incorporación de aditivos en los alimentos, etc.), permiten la conservación de los alimentos durante un período significativo. Sin embargo, los consumidores actuales buscan cada vez alimentos **menos procesados** y con **menos aditivos químicos**, lo que evidentemente incrementa los riesgos asociados. El principal riesgo radica en el posible desarrollo de microorganismos que reducen la **vida útil** y la **seguridad (inocuidad) alimentaria** del producto envasado.

Por otra parte, en el caso de productos semiprocados, la industria de alimentos se ha apoyado crecientemente en los sistemas de envasado al vacío. Sin embargo, estos sistemas implican el riesgo del crecimiento de microorganismos anaeróbicos. Por lo tanto, la posibilidad de complementar la tecnología de envasado al vacío con el uso de materiales de envase con actividad antimicrobiana incrementa la seguridad de los alimentos.

Para disminuir el riesgo de deterioro microbiológico se ha trabajado principalmente sobre el propio alimento y sobre el sistema de envasado, tratando al sistema y al material de envase como estructuras inertes que protegen al alimento, pero si se considera que el deterioro microbiológico en los alimentos se produce mayoritariamente en su superficie, se puede aprovechar como soporte el material de envase para generar un efecto activo, incorporando agentes antimicrobianos de amplio espectro que ejerzan su función sobre la superficie del alimento, aumentando su seguridad y vida útil, sin necesidad de usar aditivos químicos en el producto mismo.

En la actualidad, la industria salmonera por ejemplo, en el caso de productos con alto valor agregado (ahumados), los está exportando a mercados alejados de Chile en forma de productos congelados. Es en destino cuando estos productos son descongelados y comercializados en forma de productos refrigerados, dándoles una vida útil en refrigeración de unos 20 días. Indudablemente, el riesgo asociado a pasar de un producto congelado a otro refrigerado, en los que el envase no proporciona una protección y seguridad adicional, es alto y es fuente de preocupación por parte de las empresas salmoneras nacionales.

En el caso de salmones frescos, que se comercializan frescos refrigerados, estos son cosechados en las plantas salmoneras e inmediatamente se envasan en bolsas plásticas abiertas (generalmente de polietileno de baja densidad), y se introducen en cajas de poliestireno expandido, donde, con sistemas de hielo seco, se mantiene el producto a baja temperatura, hasta que llegue al mercado destino. A este producto se le da una vida útil de aproximadamente 15 días, lo que limita su área de comercialización. El desarrollo de un sistema que permita prolongar esta vida útil incrementaría de forma significativa la posibilidad de alcanzar nuevos mercados que se encuentran más alejados.

Ya que el principal proceso de deterioro de este producto es el microbiológico, el objetivo del proyecto fue la búsqueda de un sistema de envase activo antimicrobiano que retardase el crecimiento microbiológico para, de este modo, poder alargar la vida útil del producto.

Envases activos

Como se ha señalado, el objetivo de los materiales de envase de alimentos se orienta a minimizar las pérdidas por deterioro de estos y a

facilitar su almacenamiento y distribución, proporcionando alimentos inocuos y nutritivos. Sin embargo, en la última década, producto de las nuevas tendencias de consumo (alimentos funcionales, mínimamente procesados, listos para el consumo), el concepto tradicional de envase se ha transformado en uno de carácter activo. En este sentido, la inercia química entre el alimento y el envase, considerada como la premisa central de los envases pasivos, ha sido cambiada por la búsqueda de interacción positiva entre el alimento y el envase que se da en los envases activos (Ozdemir & Floros, 2004). El concepto de envase activo implica que el material de envase sea capaz de generar un retraso en el deterioro de los alimentos y con ello la extensión de la vida útil del alimento envasado, manteniendo con ello la calidad e inocuidad de los productos (March & Bugusu, 2007). Es así como la vida útil del alimento envasado puede ser extendida controlando alguno de los factores predominantes que conllevan al deterioro de alimentos y bebidas, tales como luz, presencia o ausencia de humedad, oxígeno, enzimas, olores y microorganismos, entre otros, lo que prolonga la vida útil del alimento (Gordon, 2006), razón por la cual los envases activos están diseñados para incorporar componentes que liberan o absorben sustancias hacia o desde el alimento envasado o del entorno de estos (Galotto *et al.*, 2012; Guarda *et al.*, 2011; Ozdemir y Floros, 2004; Quintero *et al.*, 2013). Frente a ello es que, de acuerdo a su modo de acción, pueden ser divididos en dos categorías (Guarda y Galotto, 2009):

- **Absorbedores:** son agentes capaces de eliminar los componentes indeseables del interior del envase, tales como oxígeno, dióxido de carbono, etileno, vapor de agua, aromas y otros compuestos específicos.
- **Emisores:** son agentes capaces de emitir o agregar compuestos químicos al alimento o en el espacio de cabeza del producto envasado, tales como dióxido de carbono, antioxidantes, agentes antimicrobianos.

Ahora bien, debido a que la principal causa de pérdida de vida útil en los alimentos envasados radica en el crecimiento microbiológico, procederemos a profundizar, dentro de los envases activos, aquellos con capacidad emisora de agentes antimicrobianos.

Envases activos con capacidad antimicrobiana

Tal como se mencionó anteriormente, una de las tendencias actuales de los consumidores se orienta a la búsqueda de alimentos mínimamente procesados. Es por este motivo que el potencial de aplicación de los envases activos con capacidad antimicrobiana surge como una solución óptima, ya que se minimizan los tratamientos de conservación convencionales, lo que implica la disminución de la pérdida de los componen-

tes nutricionales y organolépticos de interés (Pereira & Vicente, 2010). Los envases con actividad antimicrobiana pueden eliminar o inhibir el crecimiento de microorganismos en el alimento envasado, permitiendo extender la vida útil mientras la calidad del producto alimenticio se mantiene (Han, 2000). Lo anterior se logra mediante la incorporación de un agente antimicrobiano dentro del sistema de envasado. Este concepto involucra la liberación gradual del agente antimicrobiano desde el envase hasta el alimento, inhibiendo o disminuyendo el crecimiento de microorganismos en su superficie (Appendini & Hotchkiss, 2002). Cabe destacar que la directa incorporación del agente antimicrobiano en el alimento provoca una reducción inmediata en la población microbiana, mientras que los envases con capacidad antimicrobiana pueden mantener su actividad durante el almacenamiento después del envasado (Guarda *et al.*, 2011).

Agentes antimicrobianos

El desarrollo de envases antimicrobianos (AM) requiere de la selección previa del agente antimicrobiano que se va a incorporar al envase. Este agente antimicrobiano debe elegirse de acuerdo a diferentes parámetros, dentro de los que destacan:

- a) Capacidad antimicrobiana frente a flora microbiana causante del deterioro del producto que se va a envasar.
- b) Concentración mínima inhibitoria (CMI).
- c) Compatibilidad entre el aditivo y el envase.
- d) Mecanismo de acción.
- e) Cinética de liberación del aditivo desde el envase.
- f) Compatibilidad para contacto directo con alimentos admitido por la legislación.
- g) Que no se ocasionen alteraciones en las características físicas, químicas y sensoriales del producto envasado.

En cuanto a la naturaleza de los agentes antimicrobianos incorporados en los materiales de envase, la tabla 1 ilustra los más utilizados. Es así como una amplia gama de agentes antimicrobianos han sido estudiados. Dentro de ellos destacan sustancias tanto de origen natural como sintético. Sin embargo, las demandas de inocuidad alimentaria y el generar procesos sustentables han orientado el desarrollo y aplicación de aditivos de origen natural. Basado en esto es que diversos trabajos científicos han apuntado a la incorporación de aditivos naturales con capacidad antimicrobiana en diversas matrices poliméricas (Appendini & Hotchkiss, 2002; Suppakul *et al.*, 2003; Ramos *et al.*, 2012).

Tabla 1: Potenciales agentes antimicrobianos para ser utilizados en el envasado de alimentos.

Clasificación	Agentes antimicrobianos
Ácidos orgánicos	Acético, benzoico, láctico, cítrico, málico, propiónico, succínico, sórbico, tartárico, mezcla de ácidos orgánicos
Alcohol	Etanol
Bacteriocinas	Nisina, pediocina, lacticina, subtilina
Enzimas	Lisozima, glucosa oxidasa, lactoperoxidasa
Metales	Plata, cobre, circonio
Antioxidantes	BHA, BHT, TBHQ, sales de hierro
Antibiótico	Natamicina
Fungicida	Benomil, imazalil, dióxido de sulfuro
Gas sanitizante	Ozono, dióxido clorado, monóxido de carbono, dióxido de carbono
Sanitizantes	NaCl acidificado, triclosan, cetil piridinium clorado
Polisacárido	Quitosano
Fenólicos	Catequina, cresol, hidroquinona
Extractos de plantas	Timol, carvacrol, terpinol, linalol, cinnamaldehído, pineno
Extractos de especias	Extractos de pepa de uva, aceite de rosemary, aceite de orégano y basil
Probióticos	Bacteria ácido láctica

Fuente: Adaptación de (Han, 2000; Suppakul *et al.*, 2003).

Agentes antimicrobianos de origen natural

Dentro de los compuestos naturales con actividad antimicrobiana ha sido reconocida la efectividad que presentan los aceites esenciales (Lambert *et al.*, 2001). Con respecto a estos compuestos, la Asociación Francesa de Normalización (Afnor) los define como “aquellos productos obtenidos a partir de una materia prima vegetal por destilación mediante arrastre con vapor, por procedimientos mecánicos, entre otros, con el fin de separar la fase acuosa” (Bermúdez, 2009). Los aceites esenciales son aceites orgánicos aromáticos obtenidos en su mayoría de extractos de plantas. Dentro de las principales propiedades que destacan a estos compuestos es posible mencionar sus propiedades antivirales, antibacterianas, antifúngicas, antiparasitarias e insecticidas. Además, su uso como aditivos alimentarios se encuentra permitido por los organismos reguladores (Vukovic *et al.*, 2007). Cabe destacar que los aceites esenciales se caracterizan por ser una mezcla compleja de diferentes compuestos orgánicos, tales como hidrocarburos, alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres, éteres y fenoles (Vidal *et al.*, 2013), que imparten tanto el aroma como la actividad a este tipo de esencias. Ahora bien, la capacidad antimicrobiana de los aceites esenciales está dada por componentes específicos de estos aceites

esenciales. En este sentido, se han identificado diversos componentes de aceites esenciales de naturaleza fenólica y terpenoide, tales como timol, carvacrol y eugenol, como los responsables de la actividad antimicrobiana (Ultee *et al.*, 2000). Así, se ha reportado que los derivados de aceites esenciales poseen actividad antimicrobiana frente a una variedad de microorganismos, incluyendo bacterias gram positivas y negativas (Marino *et al.*, 2001; Smith-Palmer *et al.*, 2001). En este sentido, se ha comprobado que las bacterias gram positivas muestran una mayor sensibilidad a la acción antimicrobiana de los derivados de aceites esenciales que las gram negativas. Esta diferencia puede ser atribuida a la complejidad estructural de la membrana celular de las gram negativas, lo cual impide la difusión de los agentes activos a través de la membrana celular. En general, el mecanismo de acción de los derivados de aceites esenciales se basa en la interacción generada entre la bicapa lipídica y el agente antimicrobiano producto de la naturaleza hidrofóbica del derivado de aceite esencial. Dicha interacción induce el colapso parcial de la integridad de la membrana citoplasmática, dando lugar a la fuga masiva de metabolitos y enzimas, llevando a la muerte celular.

Dentro del grupo de los derivados de aceites esenciales se ha reportado la efectividad antimicrobiana de diversos derivados de aceites esenciales. Un ejemplo de ello son los componentes esenciales del orégano y tomillo, siendo uno de los componentes mayoritarios el timol (Figura 1) (Guarda *et al.*, 2011). El timol es un compuesto fenólico volátil mono terpeno, con alta eficacia antibacteriana.

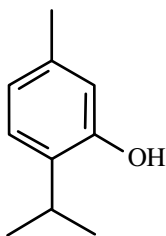


Figura 1: Estructura química del timol.

Aplicación de la nanotecnología al desarrollo de envases activos

El desarrollo de envases activos con capacidad antimicrobiana se inicia con el conocimiento e identificación previa de los microorganismos responsables del deterioro del producto específico que se va a envasar. Una vez conocidos cuáles son los microorganismos diana, se ha de identificar el compuesto que presente una capacidad antimicrobiana frente a dichos microorganismos. Además, se precisa determinar la concentración mínima de dicho compuesto antimicrobiano que debe estar presente en la

cara interna del envase, en contacto directo con el alimento. Si la cinética de liberación desde la matriz plástica hacia la superficie del alimento es muy lenta, supondría que el microorganismo que genera el deterioro del producto crecería antes que se alcanzase la concentración mínima del agente antimicrobiano requerida para que este ejerza su efecto, y si la liberación del plástico es muy rápida, se agotaría demasiado pronto el agente antimicrobiano, lo que no generaría un incremento significativo en la vida útil del producto envasado. Por lo tanto, el desarrollo de envases activos con capacidad antimicrobiana requiere de un conocimiento y control de la velocidad de liberación del agente activo antimicrobiano desde el envase plástico. Es en este campo donde la nanotecnología aparece como una herramienta eficaz tanto para la incorporación de agentes activos con capacidad antimicrobiana como para el control de la cinética de liberación de los compuestos activos en el interior de los envases.

Es por esto que la aplicación de la nanotecnología con mayor impacto en el área de innovación en envases plásticos ha sido el desarrollo de los nanocompositos. Estos se definen como una nueva clase de materiales compuestos, en los cuales una de las dimensiones de las partículas de carga o relleno (nanopartículas) se encuentra en el rango nanométrico (1-100 nm) (Duncan, 2011). Estos sistemas híbridos son, en esencia, polímeros reforzados con nanopartículas, las cuales pueden consistir de estructuras esféricas o cúbicas (cuando las tres de sus dimensiones están en el rango nanométrico), tubulares (dos dimensiones) y laminares (una dimensión), siendo esta última la forma más adecuada para obtener un máximo rendimiento (Franco & Maspoch, 2009) (Figura 2).

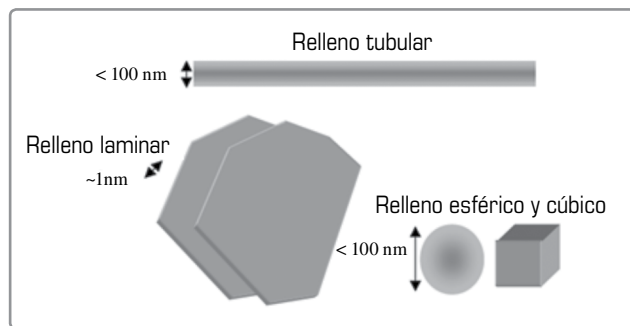


Figura 2: Estructuras con alguna de sus dimensiones de escala nanométrica.

Producto de los cambios ocasionados en las propiedades de las matrices poliméricas (principal constituyente de los plásticos) por la incorporación de nanorrellenos, la utilización de nanocompositos en el área de envases de alimentos ha sido una de las líneas más importantes en el desarrollo de nuevos materiales (Ray, 2006; Azeredo, 2009; Choudalakis & Gotsis, 2009). En el caso de la industria de envases, la atención se ha centrado principalmente en la incorporación de sólidos inorgánicos de

estructura laminar, como son las arcillas, también conocidas como filosilicatos o silicatos laminares (Sozer & Kokini, 2009) en las matrices plásticas. La trascendencia de este tipo de nanopartículas en el área de envases se ha centrado especialmente en el control de procesos de transferencia de masa, como es la permeabilidad a gases, que puede evidenciarse con la incorporación de bajas cargas de estas partículas ($> 5\%$ en peso) (Quintero *et al.*, 2013). Sumados a lo anterior su alta disponibilidad, su bajo costo y su procesamiento simple, potencian aún más la utilización de estos sólidos inorgánicos.

Las arcillas y silicatos son estructuras laminares de 1 nm de espesor y varias micras de largo. La arcilla es una roca sedimentaria consistente en mezclas de distintos minerales, esencialmente silicatos hidratados de aluminio, hierro o magnesio, junto a diversas impurezas, en forma de pequeñas partículas cristalinas y en proporciones variables. Desde el punto de vista mineralógico, las arcillas engloban en su mayor parte a un grupo de minerales filosilicatos, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y granulometría ($< 2 \mu\text{m}$). Las láminas de las arcillas presentan una estructura cristalina que está basada en el apilamiento de las capas atómicas, formadas principalmente por dos tipos de geometrías: tetraédricas y octaédricas (Figura 3). La primera se compone de tetraedros de silicio-oxígeno, siendo el silicio el que aporta cuatro cargas positivas y el oxígeno ocho cargas negativas, por lo tanto, el tetraedro se encuentra eléctricamente descompensado. Dado este desequilibrio, el oxígeno debe unirse a otros cationes para así neutralizar sus cargas. En tanto, la capa octaédrica está conformada de octaedros de magnesio o aluminio cuyos vértices están formados por oxígeno, que al igual que los tetraedros se encuentran eléctricamente descompensados, ya que si el catión es magnesio (Mg^{2+}), aporta dos cargas positivas, o bien si el catión fuese aluminio (Al^{3+}), aportaría tres cargas positivas frente a las doce cargas negativas aportadas por los oxígenos, implicando que para lograr la neutralización es necesario que los vértices formen una capa octaédrica (Uddin, 2008; Franco & Maspoch, 2009).

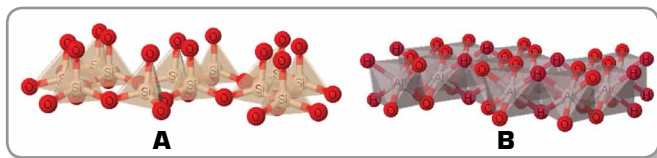


Figura 3: Geometría de las láminas que componen la arcilla
(A: lámina tetraédrica; B: lámina octaédrica).

Cabe destacar que las arcillas no son por sí mismas partículas nanométricas, sino que solo una de sus dimensiones se encuentra dentro del rango nanométrico. Es así como el espesor de las láminas que forman parte estructural de la arcilla se halla dentro de dicho rango. En cuanto a sus dimensiones laterales, estas se encuentran en función del silicato

en particular, por lo cual pueden variar desde 30 nm hasta varias micras (Franco & Maspocho, 2009). Las arcillas se clasifican en cuatro grupos según su composición: caolinita, esmectita, illitas y clorita. Dentro del grupo esmectita se encuentra el tipo montmorillonita, mineral que ha sido ampliamente utilizado en el desarrollo de nanocompositos (Hasegawa *et al.*, 2003; Morawiec *et al.*, 2005; Azeredo, 2009; Franco & Maspocho, 2009).

La montmorillonita (MMT) presenta la estructura característica de un filosilicato del grupo 2:1. Posee dos láminas tetraédricas de silicio intercalando una lámina octaédrica central de aluminio (Paul & Robeson, 2008) (Figura 4).

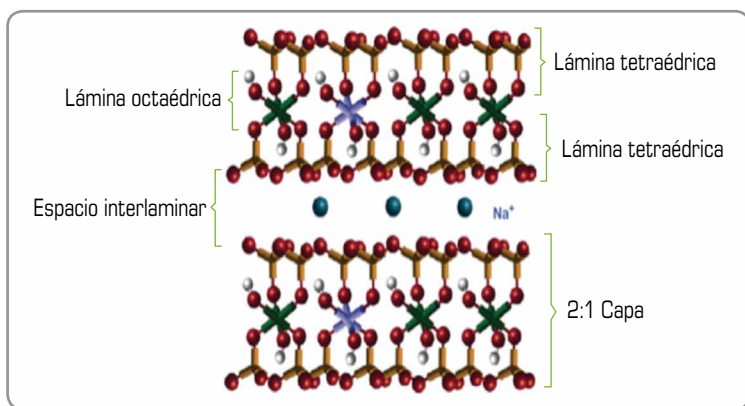


Figura 4: Estructura de la montmorillonita de sodio.

En el caso de la lámina octaédrica, esta puede ser considerada como una lámina de óxido de aluminio. Ahora bien, la diferencia de valencias generadas por la sustitución de algunos átomos de aluminio por átomos de magnesio genera una distribución de cargas negativas dentro del plano octaédrico, siendo estas equilibradas por cationes que generalmente son iones sodio ubicados en el espacio interlaminar de la MMT (Azeredo, 2009). La morfología natural de la MMT se encuentra dada por una geometría laminar, la cual facilita su hidratación, lo que da lugar al hinchamiento de mineral. Este proceso de hinchamiento puede incluso generar que las láminas queden completamente dispersadas en un medio acuoso (Paul & Robeson, 2008). Producto de la capacidad de hinchamiento y de la presencia de contraiones en el espacio interlaminar, las arcillas pueden ser modificadas químicamente en un medio acuoso con otras especies cargadas. La modificación estructural de arcillas con este tipo de aditivos da lugar a la generación de organoarcillas (LeBaron *et al.*, 1999; Xie, *et al.*, 2002).

Se han descrito tres posibles formas de interacción entre las arcillas y las matrices poliméricas, las cuales dan origen a distintas estructuras de nanocompositos (Figura 5) (Azeredo, 2009).

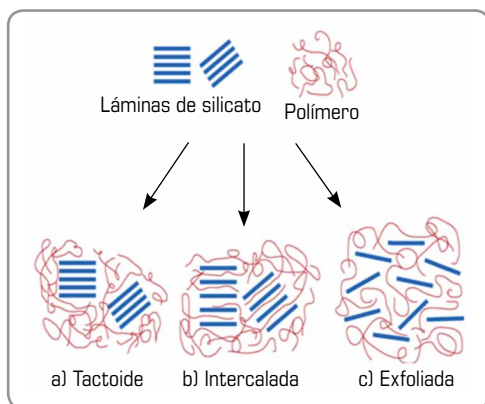


Figura 5: Tipos de nanocompositos derivados en la interacción arcilla-polímero.

Concretamente, se identifican estructuras tactoides, intercaladas y exfoliadas. En el caso de la estructura tactoide, el polímero y la arcilla permanecen inmiscibles, lo que conlleva a la aglomeración de las láminas de los filosilicatos en la matriz polimérica. Cabe destacar que este tipo de estructura no origina importantes mejoras en las propiedades del material (Ludueña *et al.*, 2007; Alexandre *et al.*, 2009). Las estructuras intercaladas, en las cuales las cadenas poliméricas penetran el espacio interlaminar de la arcilla, dan origen a una estructura ordenada donde se alternan las cadenas del polímero y las láminas inorgánicas de la arcilla (Weiss *et al.*, 2006). Por último, los nanocompositos exfoliados en los que se produce una extensa penetración del polímero en la arcilla conllevan a la dispersión aleatoria de las láminas en la matriz polimérica (Ludueña *et al.*, 2007).

En los nanocompositos exfoliados se han reportado significativas mejoras en las propiedades de barrera, debido a la mejor dispersión de las láminas de arcilla en el polímero, lo cual incrementa el efecto de paso tortuoso (Figura 6) al aumentar la dificultad de la difusión de los gases a través de las estructuras polimérica. Las arcillas originan, por tanto, un paso tortuoso capaz de bloquear el paso de sustancias permeantes por las regiones amorfas y espacios libres del polímero (Osman *et al.*, 2005; Adame & Beall, 2009; Alexandre *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2012). De igual forma, es importante mencionar que en las estructuras intercaladas se han reportado mejoras de las propiedades de barrera, con reducciones del 50 % en los valores de OTR (velocidad de transmisión de oxígeno) en nanocompositos de acetato de celulosa (Rodríguez *et al.*, 2013). Por su parte, la incorporación de nanoarcillas puede resultar en la liberación controlada de sustancias que pueden ser utilizadas en las tecnologías de envasado activo (Quintero, *et al.*, 2012). Esta innovadora tecnología ha surgido en respuesta a las nuevas demandas de los consumidores y a las tendencias actuales del mercado.

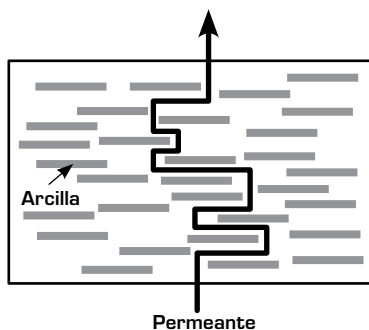


Figura 6: Paso tortuoso de los permeantes entre los nanocompositos de arcilla.

Parte II. Análisis de un ejemplo específico

Descripción de la innovación y su validación

El salmón comercializado fresco y refrigerado tiene como principal mecanismo de deterioro el crecimiento de microorganismos a nivel superficial, siendo esta la principal causa de su corta vida útil. Si bien existe la posibilidad de utilizar componentes naturales volátiles, con características antimicrobianas y que puedan ser incorporados en el material de envase, se ha de determinar el mecanismo adecuado para incorporar estos agentes en la propia estructura plástica, de forma tal que ejerzan su función directamente sobre la superficie del alimento, manteniendo esta función durante el tiempo que el producto va a estar envasado.

Por ese motivo, en el presente desarrollo se abordó el proceso de obtención de un *film* que comprende la incorporación de agentes antimicrobianos de origen natural en una estructura polimérica para el desarrollo de envases destinados a incrementar la vida útil de la carne refrigerada, preferentemente la de salmón fresco. Este proyecto, con una duración de 36 meses, fue financiado por Conicyt a través del proyecto FONDEFD06I1050, con la participación de la empresa chilena fabricante de envases plásticos flexibles HyC Packaging, que cuenta con más de treinta años de experiencia en el rubro; con la empresa Salmones Multiexport, líder en la producción de salmones a nivel nacional, y con el Laboratorio de Envases de la Universidad de Santiago de Chile (Laben-Chile), que desde hace ya más de 15 años trabaja junto con la industria transformadora de envases plásticos y usuarios del sector agroalimentario en el desarrollo e innovación de envases plásticos para alimentos, así como brindando apoyo técnico a la industria nacional.

El desarrollo planteó la incorporación del agente activo con capacidad antimicrobiana a través de un doble proceso de extrusión del material polimérico. En una primera extrusión se obtiene un *pellet* (*masterbatch*)

por medio de una mezcla del agente activo con polietileno en polvo de baja densidad (LDPE), y en una segunda extrusión se obtiene el *film*, incorporándose el *masterbatch* en proporción adecuada sobre polietileno en granza. El *film* que se utiliza para la obtención de la bolsa de envase se consigue por un proceso de coextrusión. El material final presentó tres capas, donde solo en la capa interna en contacto directo con el salmón es donde se introduce el *masterbatch* que contiene el compuesto activo, mientras que las capas intermedia y exterior aportan los otros requerimientos de estructura del *film* y no requieren incorporación del agente activo.

Estos desarrollos quedaron reflejados en dos patentes presentadas a Inapi: N° de solicitud Inapi 532-2011. "Un proceso para la obtención de un *film* que comprende la incorporación de agentes antimicrobianos de origen natural en una estructura polimérica", de los inventores Guarda, Abel; Valenzuela, Ximena; Ramírez, Alberto, y Galotto, María José. N° de solicitud Inapi 1342-2010. "Un proceso para la obtención de un *film* que comprende la incorporación de agentes antimicrobianos de origen natural en una estructura polimérica para el desarrollo de envases destinados a incrementar la vida útil de carne refrigerada, preferentemente de salmón fresco refrigerado", de los inventores Guarda, Abel; Rubilar, Javiera, y Galotto, María José.

Por lo anterior, el objetivo de la invención fue proveer un sistema de incorporación de agentes antimicrobianos de origen natural en una estructura polimérica para el desarrollo de envases destinados a incrementar la vida útil de salmón fresco refrigerado.

El desarrollo final del proyecto contempló las siguientes etapas:

i) Elaboración del *masterbatch*

La elaboración del *masterbatch*, que se realizó con timol como agente antimicrobiano (AM), (timol previamente tratado), el cual se incorporó en distintas concentraciones (2,8 %, 5 %, 10 % y 15 %), con polietileno lineal de baja densidad en polvo, el que se extruyó hasta obtener el *masterbatch*. La temperatura de extrusión fue alrededor de 170 °C (en la cabeza y el resto de zonas del tornillo).

ii) Elaboración de *film* con antimicrobiano natural por extrusión directa.

Se trabajó con el *masterbatch*, que contenía 10 % de agente AM y se mezcló con polietileno de baja densidad, con concentraciones entre 0,5 y 15 %.

iii) Determinación de la cantidad de AM natural efectiva en los *films* tras el proceso de extrusión.

Con objeto de determinar la cantidad de AM natural remanente en los *films* tras el proceso de extrusión, se determinó la concentración final mediante una extracción con solvente desde el plástico. Para ello se realizó la extracción y posterior cuantificación por cromatografía líquida de alta resolución con detector UV.

iv) Determinación de la capacidad antimicrobiana de los *films*

La eficacia antimicrobiana de los *films* fue evaluada de acuerdo a la norma ASTM E-2149, la cual permite cuantificar el porcentaje de reducción microbiana que provoca el material en estudio frente a un control. La capacidad antimicrobiana de los diferentes *films* se determinó frente a microorganismos diana, los cuales fueron: *Listeria Innocua*, como representante de los microorganismos (Gram +), y *Escherichia coli* (*E. coli*), como representante de los microorganismos (Gram -). En la Tabla 2 se precisa la capacidad antimicrobiana de los *films* desarrollados, observándose que a las 24 horas se produjo una reducción del 100 % de *E. coli*, siempre que la concentración nominal de AM en el *film* fuese superior al 10 %. Resultados similares se obtuvieron para el caso de *L. innocua*, aunque en este caso se requiere una concentración efectiva final en el *film* de solo 0,46 %.

Concentración nominal (%)	Reducción 3 horas (E. coli)	Reducción 24 horas (E. coli)	Reducción 3 horas (L. innocua) %	Reducción 24 horas (L. innocua) %
2,8	0	0	0	0
5	0	0	0	99.7
10	0	100	0	99.5
15	0	100	0	99.8

Tabla 2. Reducción microbiana de *E. coli* y *L. innocua* tras 3 y 24 horas

Determinación de la calidad del salmón fresco envasado en envase antimicrobiano

La finalidad de este análisis fue evaluar la presencia de microorganismos que causan deterioro en la carne del salmón fresco. Para ello se almacenaron muestras de salmón a 2, 4 , 8 y 10 °C durante un período de 21 días, analizándose el producto los días 1, 3, 8, 11, 15, 18 y 21, respectivamente, realizándose el seguimiento del crecimiento de los siguientes microorganismos: recuento total de aerobios mesófilos (RAM), recuento total de psicrófilos y de pseudomonas.

Los resultados mostraron que la calidad microbiológica de la carne de salmón es mejor en el caso de las muestras envasadas con el material activo antimicrobiano. En ningún caso se consigue inhibir el crecimiento microbiano, sino que se consigue una reducción en la velocidad del crecimiento de los microorganismos. Esta reducción en la velocidad de crecimiento es lo que va a otorgar al producto final una mayor vida útil, ya que se dispone de un mayor tiempo hasta alcanzar el recuento máximo de microorganismos permitido por la legislación. Según el reglamento sanitario de los alimentos, los microorganismos aerobios mesófilos no pueden sobrepasar un máximo de 10⁶ (ufc/g), lo que equivale a 6 log (ufc/g). De

acuerdo con este reglamento, la vida útil (VU) para cada temperatura de refrigeración del salmón envasado, con el material de envase tradicional y con el nuevo material de envase activo, son las presentadas en la Tabla 3, donde claramente se observa un incremento en la vida útil de la carne de salmón que va desde 23 % de incremento de vida útil cuando el producto se almacena a 2 °C a un aumento del 27 % cuando el producto se encuentra almacenado a 10 °C. Estos incrementos suponen como mínimo una disponibilidad de cinco días adicionales para la comercialización del producto (si este se hiciese a 10 °C) y hasta de nueve días si el producto se comercializa a 2 °C. Indudablemente, la comercialización del producto se hace incluso a temperaturas inferiores a las estudiadas, por lo que como mínimo se cuenta con nueve días de incremento de vida útil con el envase así desarrollado.

Temperatura	VU envase control	VU envase activo
2 °C	7,6 días	9,4 días (23 %)
4 °C	6,4 días	8 días (25 %)
8 °C	5,4 días	6,4 días (18 %)
10 °C	4,4 días	5,6 días (27 %)

Tabla 3. Vida útil (VU) de la carne de salmón en envase convencional (control) y en envase activo antimicrobiano (entre paréntesis se indica el porcentaje de incremento de vida útil).

Paralelamente se realizó el seguimiento de las características químicas del producto envasado mediante la determinación de bases volátiles no nitrogenadas en función del tiempo. Se utilizó como valor máximo admisible para este parámetro la cantidad de 30 mg BNVT/100g (lo que define el fin de la vida útil). Los resultados obtenidos mostraron valores de vida útil a 2 °C de 23 días en el caso del envase activo frente a 19 días en el caso del envase control, reduciéndose esta diferencia a medida que se incrementa la temperatura de almacenamiento.

Simultáneamente con el seguimiento de la evolución química y microbiológica del producto envasado, en el nuevo envase activo antimicrobiano se llevó a cabo un análisis sensorial que garantice que el nuevo material de envase no modifica las características sensoriales del salmón envasado. Para ello, se analizaron las muestras que estuvieron almacenadas a las distintas temperaturas señaladas en todos los análisis, a 2, 4, 8 y 10 °C, muestreando el producto los días 1, 3, 8, 11, 15, 18 y 21. Para esto se trabajó con un panel semientrenado, el que analizó cinco parámetros distintos (apariciencia general de la carne, color de la piel, color de la carne, condición de la carne, aroma), basándose en una tarjeta de puntaje con escala 0 a 3, donde 0 representa el valor inferior de cada característica, y 3, la mejor puntuación para cada característica.

Con los resultados obtenidos se estimó la vida útil a las distintas temperaturas a las cuales se almacenaron las muestras. Sobre la base de estos resultados se realizó el ajuste al modelo de Arrhenius para obtener

la relación entre la vida útil y la temperatura de almacenamiento. La aplicación de este modelo permitió definir la vida útil final del producto que fue de 22,1 días en el producto envasado con el envase activo y almacenado a 2 °C frente a 17,7 días del producto en envase control a la misma temperatura. Como era de esperar, el incremento de la temperatura ejerce un efecto negativo en la vida útil del producto, sin embargo se sigue manifestando un efecto positivo del envase activo frente al control, de forma tal que a 10 °C la vida útil del producto envasado en envase activo fue de nueve días frente a los siete días del producto envasado en el material del envase tradicional.

Se puede apreciar en los resultados la diferencia a nivel sensorial que se presenta entre ambos envases, vale decir, el envase activo y el envase control, lo cual se correlaciona de una muy buena manera con los resultados obtenidos en los análisis químicos exhibidos en los puntos anteriores, los que, al igual que lo expuesto en los resultados químicos, muestran que la diferencia entre el envase activo y el envase control va disminuyendo a medida que aumenta la temperatura. A 2 °C se puede apreciar una diferencia de más de cuatro días, lo que resulta muy significativo para los propósitos del proyecto, logrando alargar en aproximadamente 25 % la vida útil del producto.

Este desarrollo, que inicialmente se realizó en un material plástico tradicional (polietileno de baja densidad), puede aplicarse en materiales plásticos biodegradables. En este aspecto, el laboratorio de envases, en su afán de buscar alternativas de envases que generen un menor impacto medioambiental cuando estos pasan a ser un residuo, está trabajando fuertemente en aplicar esta tecnología en materiales biodegradables, en los que la nanotecnología, además de ser una herramienta para el desarrollo de envases activos, lo es también para mejorar las prestaciones de los materiales biodegradables. Estos desarrollos han llevado a la empresa Sapiens a otorgar al laboratorio de envases Laben-Chile de la Universidad de Santiago, en la última feria Fullplast 2013, el premio RES por su esfuerzo en promover y apoyar la sustentabilidad del sector en todas sus formas.

La posibilidad de desarrollar nuevos materiales de envases que permitan incrementar la vida útil de los alimentos, garantizando su calidad e inocuidad, no hace más que refrendar que cualquier innovación en este campo cumple con el concepto de innovación, entendido como la capacidad de transformar los resultados de la investigación en riqueza para la industria y para el país. Asimismo, con esta innovación en el desarrollo de envases activos antimicrobianos la empresa se posiciona como líder a nivel mundial en esta área.

Los proyectos de innovación, y concretamente este proyecto, requieren un tiempo importante para su desarrollo. En este caso, el proyecto involucró un período de cuatro años, incluyendo en este tiempo el desarrollo de la idea y de la hipótesis de trabajo, la presentación a las em-

presas, la preparación del proyecto para obtener recursos para financiar la investigación y la ejecución del proyecto en sí. Como todo proyecto, durante su ejecución hubo que vencer obstáculos asociados a la dificultad de trabajar con empresas en sí reacias a desviar parte de tiempo y recursos en proyectos de investigación con un alto índice de inseguridad, así como la dificultad de la empresa en entender los tiempos asociados a los desarrollos de I+D+I y con las dificultades para que los organismos de financiación, con un carácter más burocrático, entiendan las variabilidades que se producen desde la presentación de los proyectos y durante su ejecución, que en muchos casos requieren cambios importantes y rápidos si alguna de las hipótesis no se están cumpliendo. Todas estas dificultades se han de ir salvando durante la ejecución del proyecto, lo que requiere de un tiempo y esfuerzo importante.

Spin-off

Con el objeto de acelerar la transferencia de los conocimientos desarrollados al sector productivo se han analizado diferentes alternativas, y entre ellas da la impresión que la más razonable es la creación de un *spin-off*. Este tipo de emprendimiento va asociado normalmente a la existencia de conocimientos obtenidos a través de la investigación y protegidos mediante patentes, donde tanto las instituciones que han patrocinado la investigación como los investigadores asumen el compromiso de un emprendimiento conjunto para generar una empresa de base tecnológica que sea capaz de insertar en el mercado estos nuevos desarrollos. Indudablemente, a la fecha, la transferencia tecnológica a través de las universidades en Chile no tiene una política clara ni definida, principalmente asociada a las incompatibilidades por los cuestionamientos de que las universidades puedan crear empresas; sin embargo, por otra parte, el Gobierno está estimulando el que se creen empresas tipo *spin-off* o *start-up* a partir de las innovaciones y desarrollos obtenidos a través de los proyectos de investigación. La dificultad en conseguir congeniar estos dos aspectos hace que el número de *spin-off* o *start-up* a nivel nacional sea todavía muy bajo.

El *know-how* realizado a partir del proyecto desarrollado permitirá la transferencia tecnológica de la innovación y su aplicación a otros grupos de alimentos por medio de la validación y optimización de los resultados obtenidos. Además, durante el desarrollo del proyecto se formaron recursos humanos tanto a nivel universitario como dentro de las empresas que participaron en el proyecto, lo que favorecerá la comercialización del nuevo desarrollo.

Resumen y conclusiones

En esta presentación hemos descrito desarrollos tecnológicos logrados en el Laboratorio de Envases (Laben-Chile) de la USACH, y que se enmarca

dentro de la política del Gobierno de Chile de convertir a nuestro país en una de las 10 potencias alimentarias del mundo. El objetivo de este proyecto fue mejorar y potenciar la industria de envases y embalajes, una industria que a nivel mundial en el año 2011 alcanzó más de dos millones de toneladas, con un valor de casi tres mil millones de dólares. Además, es un rubro que ha mostrado un crecimiento significativo durante los últimos años. En particular, hemos detallado los logros alcanzados en el desarrollo de envases plásticos activos, con agentes antimicrobianos que contengan y protejan los alimentos, y a la vez permitan aumentar su vida útil y su inocuidad, sin agregar productos químicos. Varias estrategias fueron descritas, tanto de la fabricación de *films* plásticos compuestos (tricapas, con una capa activa interna) como la inclusión de nanopartículas de arcillas (en especial montmorillonita) en estos *films* plásticos. Ellos ya han mostrado su efectividad, especialmente en la industria del salmón, donde se ha logrado un incremento significativo de la vida útil del producto. A la fecha se han inscrito dos patentes y se está trabajando en la creación de un *spin-off* a objeto de transferir los logros alcanzados al sector productivo. En suma, se trata de un proyecto de investigación que ha generado importantes conocimientos, que tienen un significativo impacto innovativo tanto tecnológico como económico. El apoyo de instituciones en la financiación de este tipo de proyectos es fundamental, ya que en caso contrario, muchas empresas no se plantearían ni siquiera el abordar este tipo de proyectos, sin embargo se requiere disminuir la burocratización de la gestión de los proyectos, aumentar la flexibilidad en los gastos (cambios de ítem según requerimientos de proyecto) y, además, se necesita una definición a nivel nacional acerca de la política que se debe seguir por parte de las universidades públicas en la comercialización de los resultados de los proyectos y en la formación de empresas tipos *spin-off* o *start-up*.

Literatura citada

- ADAME, D., BEALL, G., 2009. Direct measurement of the constrained polymer region in polyamide/clay nanocomposites and the implications for gas diffusion. *Applied Clay Science*, 42: 545-552.
- ALEXANDRE, B., LANGEVIN, D., MÉDÉRIC, P., AUBRY, T., COUDERC, H., NGUYEN, Q., 2009. Water barrier properties of polyamide 12/montmorillonite nanocomposite membranes: structure and volume fraction effects. *Journal of Membrane Science*, 328: 186-204.
- APPENDINI, P. Y HOTCHKISS, J. H. (2002). Review of antimicrobial food packaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* (2002), 113-126.
- AZEREDO, H. M. C. D. (2009). Nanocomposites for food packaging applications. *Food Research International* (42), 1240-1253.
- BERMÚDEZ, M., 2009. Uso industrial de plantas aromáticas medicinales. Trabajo de tesis para optar al título de Ingeniero de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.

- BRUNA, J. E., PEÑALOZA, A., GUARDA, A., RODRÍGUEZ, F. y GALOTTO, M. J. (2012). Development of MtCu²⁺/LDPE nanocomposites with antimicrobial activity for potential use in food packaging. *Applied Clay Science* (58), 79-87.
- CHOUDALAKIS G. y GOTSIS A. (2009). Permeability of polymer/clay nanocomposites: A review. *European Polymer Journal*, 45: 967-984.
- DUNCAN, T. V. (2011). Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors. *Journal of Colloid and Interface Science* (1), 1-24.
- FRANCO, E., MASPOCH, M., 2009. Estructura general de las arcillas utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos. Vol. XII, n.º 44.
- GORDON, R., 2006. Food Packaging Principles and Practice. New York.
- GALOTTO, M. J.; VALENZUELA, X.; RODRÍGUEZ, F. J.; BRUNA, J.; GUARDA, A. (2012) Evaluation of the effectiveness of a new antimicrobial active packaging for fresh atlantic salmon (*Salmo Salar* L.) shelf life. *Packaging Technology and Science*, 25: 363-372.
- GUARDA, A., GALOTTO, M., 2009. Monografía Envases Activos para la Industria de Alimentos. Obra Independiente ISBN 978-956-319-965-9. Proyecto Innova Corfo Código: 207-6848.
- GUARDA, A.; RUBILAR, J.; MILTZ, J.; GALOTTO, M.J. (2011). The antimicrobial activity of microencapsulate thymol and carvacrol, 146: 144-150.
- HAN, J., 2000. Antimicrobial food packaging. *Food Technology*, 54: 56-65.
- HASEGAWA, N., OKAMOTO, H., KATO, M., USUKI, A., SATO, N., 2003. Nylon 6/Nanmontmorillonite nanocomposites prepared by compounding Nylon 6 with Na-montmorillonite slurry. *Polymer*, 44: 2933-2937.
- LAMBERT, R., SKANDAMIS, P., COATE, P., NYCHAS, G., 2001. A study of minimum inhibitory concentration and mode of action of oregano essential oil, thymol and carvacrol. *Journal Appl. Microbiology*, 91: 453-462.
- LEBARON, P., WANG, Z., PINNAVAIA, T., 1999. Polymer-layered silicate nanocomposites: an overview. *Applied Clay Science*, 15: 11-29.
- LUDUEÑA, L., ÁLVAREZ, V., VÁSQUEZ, A., 2007. Processing and microstructure of PCL/clay nanocomposites. *Materials Science and Engineering A*, 121-129.
- MARCH, K., BUGUSU, B., 2007. Food Packaging-Roles, Materials, and Environmental Issues. *Journal of Food Science*, 72: 39-55.
- MARINO, M., BERSANI, C., COMI, G., 2001. Impedance measurements to study the antimicrobial activity of essential oils from Lamiaceae and Compositae. *International Journal of Food Microbiology*, 67: 187-195.
- MORAWIEC, J., PAWLAK, A., SLOUF, M., GALESKI, A., PIORKOWSKA, E., KRASNIKOWA, N., 2005. Preparation and properties of compatibilized LDPE/organo-modified montmorillonite nanocomposites. *European Polymer Journal*, 41: 1115-1122.
- OSMAN, M., RUPP, J., SUTER, U., 2005. Effect of non-ionic surfactants on the exfoliation and properties of polyethylene-layered silicate nanocomposites. *Polymer*, 46: 8202-8209.
- OZDEMIR, M., FLOROS, J., 2004. Active Food Packaging Technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44: 185-193.

- PAUL D. Y ROBESON L. (2008). Polymer nanotechnology: Nanocomposites. *Polymer*, 49: 3187-3204.
- PEREIRA, R., VICENTE, A., 2010. Environmental impact of novel thermal and non-thermal technologies in food processing. *Food Research International*, 43: 1936-1943.
- QUINTERO, R. I., RODRÍGUEZ, F., BRUNA, J., GUARDA, A. Y GALOTTO, M. J. (2012). Cellulose Acetate Butyrate Nanocomposites with Antimicrobial Properties for Food Packaging. *Packaging Technology and Science*, DOI 10.1002/pts. 1981.
- QUINTERO, R.; RODRÍGUEZ, F.; GUARDA, A.; GALOTTO, M. J. (2013). Characterization of antimicrobial cellulose acetate butyrate/organoclay nanocomposites produces by extrusion process. *Packaging Technology and Science* DOI 10.1002/pts.2043.
- RAMOS, M., JIMÉNEZ, A., PELTZER, M., GARRIGOS, M.C. Characterization and antimicrobial activity studies of polypropylene films with carvacrol and thymol for active packaging. *Journal of Food Engineering* (2012), 109: 513-519.
- RAY, S., EASTEAL, A., QUEK, S. Y., y CHEN, X. D., 2006. The potential use of polymer-clay nanocomposites in food packaging. *International Journal of Food Engineering*, 2(4), art. 5.
- RODRÍGUEZ, F. J., GALOTTO, M. J., GUARDA, A. Y BRUNA, J. E. (2012). Modification of cellulose acetate films using nanofillers based on organoclays. *Journal of Food Engineering* (110), 262-268.
- RODRIGUEZ, F.J.; SEPÚLVEDA, H.M.; BRUNA, J.; GUARDA, A.; GALOTTO, M.J. (2013). Development of cellulose eco-nanocomposites with antimicrobial properties oriented for food packaging. *Packaging Technology and Science*, 26: 149-160.
- SMITH-PALMER, A., STEWART, J., FYFE, L., 2001. The application of plant essential oils as natural food essential oils as natural food preservatives in soft cheese. *Food Microbiology*, 18: 463-470.
- SOZER, N. Y KOKINI, J. L. (2009). Nanotechnology and its applications in the food sector. *Trends in Biotechnology*, 27(2), 82-89.
- SUPPAKUL, P., J.MILTZ, K.SONNEVELD y BIGGER, S. W. (2003). Active Packaging Technologies with an Emphasis on Antimicrobial Packaging and its Applications. *Journal of Food Science*, 68(2), 408-420.
- UDDIN, F., 2008. Clays, Nanoclays, and Montmorillonite Minerals. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International* 39.
- ULTEE, A., KETS, E., ALBERDA, M., HOEKSTRA, F., SMID, E., 2000. Adaptation of the food-borne pathogen *Bacillus cereus* to carvacrol. *Archives Microbiology*, 174: 233-238.
- VIDAL L., AVELLO, M.; LOYOLA, C.; CAMPOS J.; AQUEVEQUE, P.; DUNGAN, S.; GALOTTO, M.J., GUARDA, A. (2013). Microencapsulation of maqui (*Aristotelia chilensis* Molina Stuntz) leaf extracts to preserve and control antioxidant properties. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 73 (1): 17-23.
- VUKOVIC, N., MILOSEVIC, T., SUKDOLAK, S., SOLUJIC, S., 2007. Antimicrobial activities of essential oil and methanol extract of *Teucrium montanum*. *CAM* 4, 17-20.

WEISS J., TAKHISTOV P. y MCCLEMENTS J. (2006). Functional Materials in Food Nanotechnology. Journal of Food Science, 71: 107-117.

XIE, W., XIE, R., PAN, W., HUNTER, D., KOENE, B., TAN, L., VAIA, R., 2002. Thermal Stability of Quaternary Phosphonium Modified Montmorillonites. Chemistry of Materials, 14: 4837-4484.

Información técnica del proyecto

Desarrollo de envases plásticos con capacidad antimicrobiana para el envasado de salmón fresco

Financiamiento	Fuentes	Fondef/USACH/HyC Packaging/Multiexport/Clariant/ Fundación Chile
	Montos	Fondef: \$200.860.000.- USACH: \$119.585.000.- Empresas: \$108.518.000.-
Tiempo involucrado (desde la idea a la innovación)	5 años	
Patentes o registros de protección industrial (INDICAR QUÉ TIPO DE PROTECCIÓN SE REALIZÓ)	Solicitudes (n° de solicitudes)	Nacionales: Patente: 1342-2010 Patente: 532-2011
		Internacionales: (en preparación)
	Concesiones (n° de Patentes)	Nacionales:
		Internacionales:
Investigadores/gestores	Investigadores: 3 Ingeniero de proyecto: 1 Alumnos de pre y posgrado: 5 Apoyo administrativo: 1 Técnicos: 2 Personal empresas: 4	
Industria que adoptó la innovación	(en realización)	
Inversión en la innovación	Sin información	

Innovaciones en manejo pesquero y conservación en Chile

Juan C. Castilla,
Facultad de Ciencias Biológicas, Departamento de Ecología
y Centro de Milenio de Biodiversidad Marina,
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Carlos A. Moreno,
Instituto de Ciencias Ambientales y Evolutivas,
Universidad Austral de Chile.

Héctor Bacigalupo,
Sociedad Nacional de Pesca, Chile.

Resumen

El trabajo presenta tres innovaciones exitosas, no patentadas, en pesquerías y conservación marina en Chile. La primera corresponde a una innovación legislativa de comanejo en el uso exclusivo de pequeñas áreas costeras bajo la responsabilidad de comunidades de pescadores artesanales, las Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB), que se plasmó en la Ley General de Pesca y Acuicultura de 1991. En ella se recogen las investigaciones básicas y aplicadas en dos reservas marinas universitarias y en caletas artesanales piloto coronadas con las AMERB y su implementación a lo largo de todo Chile, con más de 20.000 pescadores involucrados. Se entregan, además, resultados de largo plazo, ejemplificados con extracciones y exportaciones del recurso loco, *Concholepas concholepas*. Las otras dos innovaciones se relacionan con modificaciones directas en el arte de la pesca tradicional de buques palangreros (series de espineles) para la pesca del bacalao de profundidad, *Dissostichus eleginoides*, en el sur de Chile: por una parte, con el hundimiento más rápido de los espineles, lo que evita la captura incidental (by-catch) de aves, y por otra, con el diseño de un canastillo o “cachalotera”, que

impide que los peces capturados sean depredados por mamíferos. Estas innovaciones, puestas en práctica en toda la flota pesquera nacional del bacalao, han significado mayores rendimientos económicos así como importantes aportes en temas sensibles de conservación marina. Estos casos de innovaciones abordados en este capítulo tienen elementos comunes resaltantes. En ellos, una vez que los científicos detectaron el problema y realizada la ciencia básica experimental mínima se delinearon las innovaciones y estas se pusieron a prueba primero a nivel piloto y luego se masificaron. En las fases piloto las puestas a prueba prácticas se realizaron en equipo, entre los pescadores e investigadores, incorporando el conocimiento local de los usuarios.

Introducción

En la actualidad, Chile, con un desembarque anual sostenido de 3-4 millones de toneladas métricas (TM), ocupa entre el quinto y el séptimo lugar entre los países pesqueros del mundo. En 2010, la valorización total en exportaciones de los productos marinos chilenos fue de unos 3,5 billones de dólares, de los cuales un 65% correspondieron a la acuicultura y 35% a especies marinas no cultivables o salvajes. Hacia 1994-1995, los desembarques pesqueros chilenos bordearon los 8 millones de TM anuales, los que en conjunto con los desembarques peruanos, sobre los 10-12 millones TM, representaban, aproximadamente, entre el 15 y el 18 % de los desembarques de todas las pesquerías mundiales. Las pesquerías son una actividad humana en que no existe el derecho de propiedad sobre los recursos o el territorio marino, y las actividades pesqueras de especies no cultivables ocurren en ambientes que no son controlables por el ser humano y poco predecibles. Esto, con gran diferencia de la acuicultura, agricultura o la industria forestal. Existe entre muchos de los pescadores y armadores pasión por una actividad que es característicamente de cazadores, con mayor (sector industrial) o menor (sector artesanal) apoyo tecnológico. Independiente de lo anterior, la pesca es una actividad comercial regida, cada día más, por las reglas del mercado, competencia y la globalización. La pesca cubre un amplio espectro desde la subsistencia diaria de extractores, como fuente de alimento directo, hasta actividades comerciales de exportación y procesos que agregan valor a los recursos pesqueros. Estas son algunas de las variables que se ponen en juego en el momento de que la sociedad (no solo los pescadores e industria) discute en la agenda pública “la pesca”: opinamos y discutimos sobre recursos y ecosistemas que *están sometidos a la soberanía del Estado de Chile*. Si no tomamos buenas decisiones, se corre el riesgo de que aquello que nos pertenece a todos no sea bien administrado y ocurran tragedias de sobreexplotación u otras, situación que ha sido caracterizada en la metáfora de “la Tragedia de los Comunes” (Hardin, 1968).

La innovación puede ser definida como “la introducción de algo nuevo, diferente, en o sobre un constructo ya existente y que puede referirse a un nuevo método, nueva modificación, nuevo instrumento, nueva idea o nuevo valor para el usuario o consumidor del producto o servicio”. El resultado de la innovación debería medirse, en términos comparativos, en relación con el constructo o producto preexistente, y de ser exitosa, debería mostrar un proceso más eficiente u otorgar un mejor servicio y más valorizado. Otro concepto ligado al anterior es el de transferencia de conocimiento. La generación y transmisión de conocimiento (básico, aplicado, derivado, de misión, estratégico) puede llevar a que este sea insertado en un esquema, sistema, modelo, práctica o instrumento preexistente y lo modifique, dando origen a una innovación. En pesquerías, la introducción e implementación de innovaciones técnicas (redes, aparatos de pesca) en las grandes flotas es muy difícil de lograr, ya que priman las experiencias y las tradiciones pesqueras de larga data. Sin embargo, es frecuente encontrar innovaciones en lo legislativo, por ejemplo, en los currículos educativos. En resumen, en pesquerías se producen innovaciones en los siguientes campos: a) en los métodos de manejo pesquero vía legislación: acceso abierto, acceso cerrado, comanejo, usos de derechos individuales o comunitarios de pesca, sistemas de cuotas individuales, sistemas de licitaciones; b) en los métodos y técnicas para localización y evaluación de cardúmenes o bancos pesqueros: información satelital, GPS, ecosondas, distintos tipos de modelos de evaluación de poblaciones explotables, uso de métodos heurísticos y predicciones de capturas a través de métodos de redes neuronales; c) en los sistemas y artes extractivos para la optimización de la extracción: modificaciones de redes de pesca, jaulas, trampas de buceo, arrastre, espineles, palangres para evitar la pesca incidental (by-catch); d) en los procesamiento de la pesca a bordo y en tierra: sistemas de frío, desembarques, selección de peces, e) en procesos de planta o de comercialización

En Chile, durante la década de los 80, la estrategia pesquera fue la de regímenes de acceso abierto, la que unida a los incentivos para la extracción y exportación de los recursos marinos redundó en severas sobreexplotaciones de varios de ellos (Castilla, 1997; Castilla *et al.*, 1998; Castilla & Fernández, 1998). A comienzos de los 90, la Ley General de Pesca y Acuicultura N° 18892 enfrentó esos problemas tanto para el sub-sector pesquero artesanal como industrial, e introdujo innovaciones legales respecto de derechos de pesca y delimitaciones del espacio oceánico o zonificaciones y planes de comanejo (Castilla, 1994a, 2010; Peña-Torres, 1997; Castilla, 2010; Gelcich *et al.*, 2012). De particular trascendencia fue la innovación, basada en un grupo de conocimientos científicos sólidos, para generar la herramienta de comanejo de Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB) para la pesca artesanal más costera. Otro ejemplo de innovaciones con bases científicas fue el desarrollado para la pesca con palangre (series de anzuelos)

del recurso demersal bacalao de profundidad, *Dissostichus eleginoides*, Patagonian toothfish. La pesquería de este bacalao en aguas chilenas ha sido cuestionada por organizaciones de conservación internacionales (Greenpeace, Monterey Aquarium Seafood-Watch Program), entre otros aspectos, porque causa efectos colaterales de mortalidad o pesca incidental (by-catch) sobre aves marinas icónicas, como en el albatros gigante de ceja negra y los petreles. En muchos mercados y restaurantes del mundo se recomienda no consumir el Patagonian toothfish. La Convención para la Conservación de Recursos Vivos Marinos Antárticos (CCRVMA), de la que Chile forma parte, ha investigado por más de treinta años temas de manejo pesquero y de conservación de este bacalao y de las aves marinas afectadas por la pesca incidental. La investigación científica realizada en Chile, con fondos nacionales, se ha traducido en innovaciones legislativas y técnicas de importancia y ha redundado en un manejo más racional de algunas pesquerías y al mismo tiempo en una mayor conservación

Ejemplo 1: Las Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB)

El escenario preinnovación

En Chile, en la década de 1980, varios recursos marinos artesanales bentónicos (de fondo) autóctonos, valiosos en los mercados internos y externos, objetivo de pesca de más de 10.000 buzos, como el loco, *Concholepas concholepas*, el erizo, *Loxechinus albus*, otros moluscos, crustáceos y varias especies de algas, habían alcanzado grados de alta sobreexplotación, lo que llevó, hacia el final de la década, a una crisis socioeconómica en comunidades artesanales. Entre las principales causas se pueden mencionar los incentivos pesqueros vía créditos estatales al sector artesanal, con aumentos de flotas y de pescadores, y la adopción de políticas neoliberales y de acuerdos de libre comercio, conducentes a la apertura a mercados internacionales y a exportaciones indiscriminadas de productos pesqueros (Castilla, 1990; Schurman, 1996). Previo a 1990, la legislación referente a recursos bentónicos artesanales era deficiente, existían escasas regulaciones y se aplicaba una política pesquera de acceso abierto. Más aún, la trashumancia de flotas y de pescadores artesanales a lo largo del país, en especial de los buzos, era recurrente y causaba serios problemas de convivencia, incluso con casos de decesos por conflictos entre pescadores. Por ejemplo, para el recurso loco (recurso icónico más resaltante de la pesquería bentónica chilena), el año 1980 marca el punto de máxima extracción, con 25.000 TM, en una pesquería que venía en ascenso constante desde 1968, con desembarques iniciales de 5.000 TM. A partir de 1980, los desembarques de loco comienzan a descender sistemáticamente hasta alcanzar entre 7.000 y 9.000 TM en 1986-1988, posiblemente

debido a una sobreexplotación. La autoridad pesquera implementa una serie inconexa de medidas regulatorias y, además, ver “guerra del loco” (Schurman, 1996). El año 1988 marca un punto de inflexión socioeconómico para la pesca artesanal, de carácter grave para los recursos bentónicos nacionales, en especial para el loco. En 1989, como una forma de ayudar a la recuperación de las poblaciones de esta especie, la autoridad establece una veda total para esta pesquería por 4 años: 1989-1993, lo que se traduce en serios conflictos pesqueros y sociales para miles de pescadores y en el desencadenamiento de disputas con la autoridad y extracciones ilegales, que según nuestras estimaciones alcanzaron a *ca.* 6.000 TM al año.

Los escenarios de investigación básica y aplicada que conducen a la innovación

En forma pionera, temprano en la década del 1980, ecólogos marinos de la Universidad Austral de Chile, Estación Costera de Mehuín, y de la Universidad Católica de Chile, Estación Costera de Investigaciones Marinas, ECIM, ubicada en Las Cruces, crean dos pequeñas áreas protegidas o reservas marinas para la pesca artesanal, ambas de menos de 1 km de extensión de costa y con fondos marinos de 5 a 10 hectáreas, excluyendo a buzos y a pescadores de subsistencia, mariscadores y extractores de orilla y protegiendo con eficiencia dos sistemas costeros intermareales y del submareal somero rocoso separados por varios centenares de kilómetros (Castilla, 1996). Mehuín operó como un área de exclusión entre 1978 y 2000 y luego dejó de funcionar, mientras que ECIM ha funcionado ininterrumpidamente desde 1982 (Navarrete *et al.*, 2010). Los fondos para establecer y mantener estas estaciones y sus áreas protegidas, que dan origen a la innovación de las AMERB, fueron de origen nacional e internacional. Para Mehuín, entre 1978-1991, se identifican al menos 3 proyectos Conicyt-Fondecyt por un total de *ca.* US\$ 150.000 y fondos de Corfo por *ca.* US\$ 120.000. Para ECIM, entre 1982-1991, que es el período de las investigaciones básicas y aplicadas que llevan a la innovación, se contó con un proyecto del International Research Centre Canadá (IDRC) por un total de *ca.* US\$ 800.000 y 3 proyectos Conicyt-Fondecyt por *ca.* US\$ 250.000. En los 6 a 8 primeros años de operación de estas dos reservas se obtuvieron resultados de trascendencia ecológica y pesquera. Por ejemplo, se comprobó la importancia de los extractores/pescadores como depredadores clave en las estructuras y funcionamientos de las comunidades bentónicas. Las dinámicas ecológicas se mostraron diametralmente diferentes entre el interior y exterior de las reservas (Moreno *et al.*, 1984, Durán & Castilla 1989, Castilla *et al.*, 1994, Branch & Moreno, 1994), lo que indicó que en estas costas la presión de depredación humana sobre invertebrados marinos carnívoros, herbívoros, filtradores y algas era un factor ecológico determinante (Moreno *et al.*, 1987; Castilla

1999). En cuanto a aspectos pesqueros, las reservas mostraron que en pocos años se producían recuperaciones naturales de poblaciones de invertebrados y algas de importancia artesanal, como locos, lapas, erizos, mitílicos, cohayuyo y otras (Castilla & Durán, 1985; Godoy & Moreno, 1989; Moreno, 2001; Castilla *et al.*, 2007), señalándose así el camino para la transferencia de conocimiento y la implementación piloto de experiencias en las caletas de pescadores. En 1989 (previo a la dictación de la Ley de Pesca de 1991) el proyecto Fondecyt n° 3503 (J.C. Castilla) de US\$ 40.000 permitió el escalamiento, transferencia de conocimiento y puesta en práctica piloto del esquema de las reservas, usando caletas con áreas submareales aproximadamente 10 veces mayores que las de las reservas universitarias. Dos caletas fueron las pioneras: Quintay y El Quisco, y en ellas se implementó, en forma innovadora, entre investigadores de la PUC y acuerdos de participación con los pescadores, un modelo de comanejo pesquero artesanal: las de Áreas de Manejo y Extracción de Recursos Bentónicos. El principal recurso objetivo de recuperación de estos planes fue el loco (Castilla, 1994a, b; Castilla *et al.*, 1998). Los investigadores y pescadores de Caleta Quintay obtuvieron del Gobierno la primera autorización en el país para establecer un área de buceo exclusiva de recursos bentónicos (Decreto Supremo n° 203, 1991). Entre 1989-1991, las experiencias de repoblamiento natural, por descanso extractivo de recursos bentónicos en estas caletas, fueron exitosas para repoblaciones de locos y de otros mariscos comerciales, validando así los resultados de las reservas universitarias. En estas caletas, las evaluaciones de líneas bases de poblaciones (pre-intervención) y resultados de repoblamientos naturales (pos-intervención) fueron realizadas en conjunto entre pescadores e investigadores y ello le dio al proyecto credibilidad y aceptación por los pescadores y la autoridad pesquera. Adicionalmente, en otras caletas de Chile Central y del Norte Chico, en forma ligeramente precedente, simultánea o posterior a lo descrito, se realizaban experiencias de comanejo con instrumentos similares a los que operan con las AMERB. Entre ellas es dable destacar aquellas pioneras realizadas en caleta Hornos, IV Región (1977-1980, J. C. Castilla y equipo) y en caleta Ventanas (equipos de IFOP) y otras, incluso lideradas por los propios pescadores, en la III y IV Región de Chile.

Las AMERB como innovación de manejo y la Ley de Pesca de 1991

La LGPA de 1991 recogió esta innovación de comanejo en el Título IV “De la Pesca Artesanal”, Artículo 48, letra d: *“Un régimen denominado ‘Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos’, al que podrán optar las organizaciones de pescadores artesanales legalmente constituidas. Estas áreas serán entregadas mediante resolución del servicio, previa aprobación por*

parte de la Subsecretaría de un proyecto de manejo y explotación del área solicitada, a través de un convenio de uso hasta de cuatro años, renovable conforme al mismo procedimiento. Para estos efectos el servicio solicitará la destinación correspondiente al Ministerio de Defensa Nacional”.

Estas áreas de fondos bentónicos, en promedio de ca. 100 hectáreas, que no incluyen la columna de agua, son de acceso exclusivo de las organizaciones de pescadores artesanales y están localizadas en todo Chile, en zonas costeras, tanto dentro de las 5 millas exclusivas de la pesca artesanal, entre el límite con Perú hasta los 43°25'42" lat. S., en los entornos de las islas oceánicas y además en las costas de la XI y XII Región. Las AMERB constituyen una *innovación de comanejo pesquero artesanal comunitario*, en que la responsabilidad del cuidado, evaluación y extracción de las especies bajo manejo (unas 25 especies bentónicas) recae en las comunidades. La Subsecretaría de Pesca otorga cada año, habiendo analizado las evaluaciones de stocks realizadas por técnicos contratados por las comunidades y sobre la base de la reglamentación de las AMERB, las cantidades de recursos (Total Allowable Catch) que se extraerán desde cada AMERB. En 2012, la Ley de Pesca de 1991 fue reestudiada y reformulada, no obstante las AMERB no fueron objeto de modificaciones. Hasta marzo 2013 existían 773 AMERB decretadas en distintos estados de operación, que en conjunto cubren una superficie de fondos marinos de aproximadamente 1200 km² e involucran a entre 22000 y 25.000 pescadores. Desde el punto de vista pesquero, las AMERB no representan grandes volúmenes de extracción artesanal, ya que, considerando todos los recursos manejados en ellas, los desembarques no superan en promedio las 12.000 TM año. No obstante, varios de los recursos presentan altos valores comerciales para los pescadores (ej. loco, lapas, algas), las extracciones se pueden planificar y los recursos pueden ser vendidos a los intermediarios antes de ser extraídos. Más aún, las AMERB, como antípodas de la pesca de libre acceso, han consolidado y empoderado a las organizaciones de pescadores no solo desde el punto de vista pesquero, sino que también de las negociaciones territoriales y de conservación (compensaciones) con respecto a otros usuarios del borde costero, como algunas industrias. El loco es la especie que ha guiado el desarrollo de la herramienta de manejo de las AMERB. Estas son consideradas por investigadores en pesquerías como la máxima expresión de comanejo pesquero artesanal (Hilborn & Hilborn, 2012) y mencionadas como un ejemplo de nivel mundial. Sin embargo, su diseño, implementación y operación no están ajenos a las críticas, incluso por algunas comunidades de pescadores y se requiere más investigación socio-pesquera-ecológica para sus perfeccionamientos.

Las AMERB como una herramienta de manejo: análisis de una serie de tiempo para desembarques y valorizaciones del recurso loco

La Figura 1 muestra la serie de tiempo entre 1968-2012 para desembarques en playa y valorizaciones de las exportaciones de locos procesados a mercados internacionales. En Chile, para esta especie u otras especies de invertebrados bentónicos artesanales no existe información oficial sobre los estados de los *stocks*, ni sobre índices de captura por unidad de esfuerzo. Es así, desgraciadamente, que los análisis pesqueros históricos no pueden relacionarse con aquello. Después de 15 a 20 años de la implementación de las AMERB, en Chile el loco es el único recurso bentónico de la pesca artesanal que se puede legalmente extraer solo y exclusivamente desde el interior de las AMERB. Esto no obsta a que el recurso sea extraído ilegalmente (en cantidades oficialmente desconocidas, pero que podrían bordear entre 2.000 y 3.000 TM al año; información personal de JCC). Sin embargo, la señal de manejo pesquero indica que si los pescadores van a extraer este recurso en forma legal, necesariamente tienen que organizarse, solicitar una AMERB y cumplir con los reglamentos que las regulan. Esto no es un tema menor para los intermediarios y empresas exportadoras, que compran y procesan el producto y que necesitan demostrar su origen. Así, las estadísticas oficiales de desembarque de locos muestran bien lo que se extrae legalmente desde las AMERB. Por otra parte, es muy posible que lo correspondiente a extracción ilegal en su mayoría se consuma en Chile. La Figura 1 ha sido analizada previamente, en una escala temporal menor que la de este trabajo (Castilla, 1994b; Castilla & Defeo, 2001; Gelcich *et al.*, 2012); sin embargo, es válido reanalizarla, pues en la última década han ocurrido situaciones de mercado en las exportaciones del loco que no ha sido consideradas en estudios previos. Las innovaciones en manejo pesquero, sobre recursos de bien público no patentables, están sujetas a diferentes vaivenes de acuerdo al comportamiento de distintas variables, como las naturales, de manejo propiamente tales, de gobernanza y de mercado. En la Figura 1 se observan los desembarques en playa y exportaciones de locos procesados para dos períodos: a) entre 1968-1992 para pesquerías de acceso abierto, b) entre 1993-2011 con AMERB. Se pueden identificar 6 fases de desembarques y de exportaciones. La fase 1 (años 1968-1980) muestra un incremento sostenido de los desembarques desde aproximadamente 4-5.000 TM hasta un pico máximo en 1980 de alrededor de 25.000 TM. En esta fase, en 1977 se informa por primera vez de sobreexplotaciones, con la apertura de mercados internacionales en Asia. Las valorizaciones de locos procesados y exportados alcanzan 20.000-30.000 dólares americanos por tonelada. En la fase 2 (años 1981-1988) los desembarques comienzan a decaer y a fluctuar (a pesar de mantenerse los mercados internacionales); esto muy posiblemente por una sobreexplotación del recurso. En 1986

se alcanzan los mínimos desembarques, con cerca de 6.000 TM año. A medida que los desembarques decaen y fluctúan, el precio internacional asciende hasta aproximadamente 10.000 dólares por tonelada exportada en 1987: lo que se podría interpretar como un efecto de oferta y demanda. En la fase 3 (años 1989-1992) se decreta un cierre total de la pesquería y se desencadenan problemas socioeconómicos entre los pescadores artesanales-buzos, por este y otros recursos que muestran sobreexplotaciones. En el año 1991 se aprueba la LGPA y se introduce la innovación de manejo de las AMERB (ver arriba), que se implementan mayoritariamente en Chile a partir de 1995, cuando se dictan los reglamentos y el recurso loco comienza a ser extraído mayoritariamente y luego exclusivamente desde las AMERB. En este período de 19 años de funcionamiento de las AMERB se observan al menos dos patrones diferentes con el período de 21 años pre-AMERB: a) los desembarques totales son más reducidos, menos fluctuantes y se estabilizan en torno a *ca.* 4.000 TM al año; b) los precios de exportación por tonelada procesada de loco, principalmente en conservas y congelados, son en promedio más del doble de los del período pre-AMERB. En el período de la AMERB se distinguen las fases 4, 5 y 6. La fase 4 (años 1983-2000) es la que sigue al período de cierre pesquero de 4 años, con un máximo en valorización de locos exportados de sobre 25.000 dólares por tonelada; posteriormente existe una disminución y ascenso hasta los 23.000 dólares (año 2000). En esta fase el loco de exportación chileno competía en los mercados internacionales con el abalón no cultivado (*Haliotis* spp), que mostraba precios por tonelada exportada similares. La fase 5 (años 2001-2010) muestra una mantención de los desembarques nacionales de locos, pero una tendencia constante a la disminución del precio internacional por tonelada exportada, desde 22.000-20.000 dólares hasta mínimos de 13.000 dólares. Esto causó problemas de ingresos a las comunidades de pescadores artesanales con AMERB, ya que el precio de playa que pagaban los intermediarios a los extractores en las caletas cayó en aproximadamente un 50-60 %. Dos parecen ser las causas de esta pérdida de competencia del loco chileno de exportación en los mercados internacionales: a) el ingreso de locos peruanos en los mercados internacionales (años 2001-2002) de menor tamaño y menor precio, b) el ingreso masivo en los mercados internacionales en 2002 de grandes volúmenes de abalones cultivados. La incipiente fase 6 (años 2011-2012) muestra una recuperación de los precios internacionales de mercado para el loco proveniente de Chile, hasta nuevamente sobrepasar los 20.000 dólares por tonelada procesada exportada; esto, a pesar de la continua oferta de abalones de cultivos.

Impactos y beneficios de la innovación

Desde el punto de vista de la innovación, los beneficios pesqueros, ejemplificados arriba con el recurso loco, necesitan ser contextualizados. Lo

más trascendente en innovaciones relacionadas con manejo sustentable de recursos biológicos renovables, como son las pesquerías, es considerar que se trata de *“cómo se innova para que la sustentabilidad de la biomasa extraíble se mantenga en el tiempo”*. Si el punto de partida en la innovación es uno de extracción de la biomasa sobreexplotada, con alto valor en el corto plazo, entonces lo esperable es que la innovación consista en alcanzar extracciones de biomasa sustentables en el tiempo, con valores altos en el largo plazo, pero menores que aquellas del punto de partida de sobreexplotación. Esto es lo que ocurrió con la introducción de las AMERB y la extracción del loco. Otro tema es la valorización de los recursos exportados al mercado internacional, ya que allí intervienen variables como oferta-demanda, competencia con otros productos, precios, calidad y eficiencia del mercadeo. La innovación en manejo puede alcanzar el objetivo biológico de sustentabilidad de la biomasa en el tiempo, pero no necesariamente el segundo de valorizaciones en el corto plazo. La belleza de la interpretación de la combinatoria de ambos procesos, en el caso de los desembarques y exportación de locos procesados, es que una vez alcanzada la sustentabilidad extractiva en biomasa en el tiempo (que si se logra, ver Figura 1) se observan varias combinatorias en valorización. Esto último desafía la innovación comercial en mercadeo y la agregación calidad y valor a los productos extraídos, lo que puede ser exitoso o fracasar, independientemente de la lograda sustentabilidad de la biomasa vía la innovación en manejo. Adicionalmente, las AMERB han contribuido en Chile no solo en la sustentabilidad de recursos bentónicos con connotaciones económicas positivas, sino que socialmente a la cohesión y empoderamiento de las comunidades, y estos son elementos no necesariamente planificados en la innovación pesquera de las AMERB. Por lo tanto, es un error evaluar la herramienta de manejo de las AMERB exclusivamente en términos económicos. Las AMERB son una innovación en co-manejo que agregan participación a los pescadores en el manejo de los recursos, entregan predicción extractiva y de negociación, evitan la tragedia de los comunes, aportan coherencia social y empoderan a las comunidades. Los impactos y beneficios académicos del desarrollo de esta innovación en Chile han sido numerosos en investigación básica, aplicada, formación de investigadores, generación de liderazgos y tienen connotaciones internacionales. Entre 1978-1991, aproximadamente un total de 40-45 estudiantes de pregrado y ayudantes (biólogos, biólogos marinos) y 8-10 estudiantes de posgrado (magíster, doctorado) estuvieron involucrados tanto en la U. Austral de Chile como en la Universidad Católica en el desarrollo de las etapas básicas y aplicadas que condujeron hacia la innovación de las AMERB. El total de publicaciones es de difícil contabilidad, pues es complejo separar aquellas directamente relacionadas con la innovación de otras más básicas y tangenciales. Sin embargo, entre 1978 y el presente (muchas publicaciones se han extendido mas

allá de cuando se decretaron las AMERB en la Ley de Pesca) se pueden contabilizar sobre 40-50 directamente relacionadas con la innovación. Las AMERB se han transformado en una sólida línea de investigación chilena y hoy existe en el país un grupo de unos 100 investigadores en ciencias básicas, aplicadas y técnicos, en al menos 6 universidades nacionales, organismos del Estado (IFOP, SS-Pesca, SERNAPESCA) y 5-6 consultoras, que trabajan en temas de AMERB. En los pasados 20 años se identifican al menos 20-25 tesis de pre y posgrado y seminarios de investigación realizados sobre el tema. Unos 12-15 investigadores extranjeros de alto prestigio han trabajado en Chile, publicado o emitido informes, en conjunto con investigadores nacionales, acerca de esta materia. La innovación AMERB se ha transformado en ejemplo de libros en que se basan clases universitarias de pre y posgrado en universidades nacionales y extranjeras. El diseño de las AMERB y su implementación en Chile es un tema de referencia internacional no solo en publicaciones científicas y libros (McClanahan & Castilla, 2007; Hilborn & Hilborn, 2012), sino que para organizaciones como el Banco Mundial (Castilla & Gelcich, 2006) o la FAO (Castilla & Gelcich, 2008). No existe en el mundo otra red costera de comanejo marino como la de las AMERB, con organizaciones de pescadores y un ordenamiento jurídico sostenido. Hoy, en comanejo pesquero artesanal de recursos bentónicos Chile es sin duda un referente mundial y esto es independiente del resultado de los objetivos y logros de todas las AMERB. Además, estas se han imitado y adaptado en legislaciones pesqueras como las de Perú y Uruguay (Defeo, 2011).

Ejemplo 2: Pesquería del bacalao de profundidad *Dissostichus eleginoides*

En Chile, desde 1989, existe una pesquería artesanal y otra industrial para esta especie. La pesca industrial es manejada con licitaciones anuales y asignación de cuotas de pesca (Subsecretaría de Pesca, 2010). En los pasados 10 años las cuotas han fluctuado entre 2.000-3.000 TM por año, con un valor promedio de mercado de *ca.* US\$ 30 millones. Este bacalao circunantártico tiene varios *stocks* pesqueros y el del cono sur de Suramérica se encuentra en aguas profundas, bajo los 1.000 m, a lo largo de las costas de Chile, Patagonia argentina, Islas Malvinas y costa norte del Arco de Escotia.

Los problemas pesqueros y escenarios de preinnovación

Durante las actividades de pesca, los buques presentan múltiples interacciones con las especies marinas que no son especies objetivo de la pesca y esto es conocido como captura o mortalidad incidental (*by-catch*), por

la falta de especificidad de las artes de pesca sobre las especies objetivo. En Chile, estas mortalidades se han observado y cuantificado solo en años recientes gracias a los embarques de observadores científicos en los buques. Entre las especies que más interactúan con las artes de pesca de los buques palangreros (espineles) están las aves marinas y particularmente aves símbolos, como los albatros y petreles del sur de Chile. Estas aves, de gran tamaño, que viven 30 a 40 años, anidan en islas del sur de Chile entre septiembre y diciembre. Durante este período, las hembras colocan un huevo, que es empollado en forma alternativa por el macho y la hembra, de modo que si muere uno de ellos el otro no puede llevar la cría a término. Poblacionalmente, esto significa que si un albatros es incidentalmente muerto en la pesca, la población pierde a tres individuos: el desaparecido, la cría y el sobreviviente, ya que este último necesitará varios años para volver a emparejarse. Desde 1989, en el extremo sur de Chile se desarrolló la pesquería de palangre del bacalao de profundidad y una treintena de buques comenzó a pescar con el palangre/espinel español clásico, que usa una línea madre central de pesca con múltiples anzuelos y cuerdas de polipropileno. Estos al ser calados (lanzados por la popa del buque) son inicialmente boyantes y los anzuelos con la carnada quedan cerca de la superficie por unos 200 a 300 m detrás del buque y al alcance de las aves marinas, las que al tomar una carnada se enganchan al anzuelo y son hundidas con el espinel ahogándose. La discusión técnica del problema de mortalidad incidental de aves marinas en las pesquerías de palangre del bacalao se inició en la Convención de Conservación de los Recursos Vivos Marinos de la Antártica (CCRVMA), de la cual Chile es parte. Esto, a partir de 1990, cuando observadores de Birdlife International informaron que durante la recuperación de tres palangres calados de noche por un buque ruso se había observado a dos albatros y a cuatro petreles muertos enganchados en los anzuelos. Así surgió una tasa de mortalidad de 0,66 aves por cada 1000 anzuelos. Este dato fue corroborado por Ashford *et al.*, (1995) desde observaciones en el buque chileno Friosur V, operando en los alrededores de la isla South Georgia, donde se registró una mortalidad de 98 aves marinas, con una tasa promedio de mortalidad de 0,47 aves por cada 1000 anzuelos. Estos datos, extrapolados a toda la flota palangrera que opera en dicha área, indican que la flota podría estar eliminando por pesca incidental alrededor de 2300 petreles de mentón blanco y 1150 albatros de ceja negra. Esto se consideró extremadamente grave, por lo que la CCRVMA convocó en 1994 a una reunión del Grupo de Trabajo sobre mortalidad incidental en las pesquerías de palangre (WG-IMALF), bajo la coordinación de su presidente, el Dr. C. Moreno (Chile). Como resultado se sugirió a los países de la CCRVMA poner observadores científicos en todos los buques palangreros del bacalao y además iniciar como medida de mitigación el uso de líneas espantapájaros (= cuerdas con colgajos de plástico en la zona de popa o posterior del buque para espantar a las aves al momento de calar

el palangre). Esta última medida mostró una reducción en la mortalidad incidental de aves, pero no todos los buques alcanzaban los estándares necesarios para reducir totalmente tal mortalidad (Melvin *et al.*, 2004). En Chile se inició el estudio de la mortalidad incidental por la pesca del bacalao de profundidad con el proyecto del Fondo de Investigación Pesquera, FIP 2001-31 (*ca.* US\$ 60.000), adjudicado a la Universidad Austral de Chile. El enfoque fue recolectar información de observadores científicos en los buques palangreros de 10 variables que pudiesen afectar la muerte incidental de aves marinas por los palangres, usando líneas espantapájaros como medida de mitigación. El uso de un modelo lineal general (GLM) indicó, para los datos tomados en 2001, que los factores que más afectaban la tasa de mortalidad de aves eran el estado del mar y la intensidad del viento. Ninguno de estos factores podía ser manipulado para reducir la mortalidad incidental. Así, se enfrentó el problema de desarrollar innovaciones en las artes de pesca, ya que las extrapolaciones indicaban que la mortalidad incidental de aves por la flota palangrera del bacalao de profundidad que opera en Chile, en 16 años podría ser responsable de la muerte de hasta 75.000 albatros. Con el apoyo del proyecto FIP 2003-21 (US\$ 30.000) se pusieron observadores científicos en embarcaciones artesanales, que operaban a lo largo de la costa chilena entre el Golfo de Penas y la Isla Mocha. Con sorpresa, se encontró que en esta flota casi no existía muerte incidental de aves (=2 petreles de mentón blanco para un total de 27 millones de anzuelos calados (Moreno *et al.*, 2006). Esto, en contraste con la flota industrial palangrera que en 2001 registró muerte incidental para *ca.* 1532 albatros de ceja negra, para 8.359.192 de anzuelos calados. La razón de la diferencia era que las tasas de hundimiento del palangre artesanal eran altas, ya que los anzuelos encarnados se hundían con rapidez debido a que cada línea secundaria del espinel llevaba en su extremo un peso (Figura 1). Esto, a diferencia del palangre industrial español, que quedaba en la superficie 200-300 m detrás de la popa del buque antes de hundirse. El año 2004 se colocó línea espantapájaros en todas las naves industriales y se volvió a estimar la mortalidad incidental de aves, la que disminuyó a 448 albatros, para un total de 10.869.695 anzuelos calados; pero el problema no se eliminó totalmente (Moreno *et al.*, 2008). Un segundo problema pesquero, que condujo a investigaciones e innovaciones de los palangres del bacalao, fue que en la flota industrial los cachalotes y otros mamíferos atacaban los espineles del palangre removiendo una cantidad importante de peces.

Las innovaciones

La primera innovación consistió en cambiar la línea madre del palangre español clásico (un arte de pesca utilizado por mucho tiempo) por uno con línea secundaria libre y usar las líneas verticales, que se desprenden de la línea madre, para poner los anzuelos agrupados en racimos de 6-10

anzuelos, a ambos lados del fin de la línea. A cada línea se le agregó un peso en su extremo que resulta en una tasa de hundimiento de $> 0.8-1.1 \text{ m s}^{-1}$ (Moreno *et al.*, 2007), sin dar oportunidad a las aves de engancharse en los anzuelos, eliminándose así la muerte incidental.

En la Figura 2a se muestra el diseño del palangre español original, que produce la muerte incidental de aves marinas y la innovación (Figura 2b) introducida por Moreno *et al.*, 2008). La tasa de hundimiento del nuevo arte de pesca es tres veces más rápida que la del palangre español. Además, posteriormente, se demostró que las operaciones de pesca con el nuevo arte arrojan mejores rendimientos de pesca (Figura 2b). La segunda innovación en el palangre clásico consistió en agregar un cono de red que se desplaza a lo largo de la línea secundaria y que una vez recogido el palangre hacia el buque protege al pez capturado dentro de dicho cono, haciendo más difícil su ataque y remoción por parte de cachalotes y otros mamíferos. La innovación se conoce como “cachalotera” y se introdujo en la flota en 2007. Ello se tradujo en una reducción de depredación por cachalotes y otros mamíferos de hasta un 5 % de la captura (Hucke-Gaete *et al.*, 2004, Moreno *et al.*, 2008).

Impactos y beneficios de la innovación

Teniendo en cuenta que la pesquería industrial chilena del bacalao tiene un valor de exportación de aproximadamente US\$ 30 millones, el uso del nuevo arte del palangre y las “cachaloterías” habría significado entre 2007-2011 un beneficio económico de aproximadamente 7,5 millones de dólares (solo para la flota nacional del bacalao). A partir del 2007-2008, las innovaciones descritas, no patentadas, han sido adoptadas por toda la flota industrial de bacalao que opera en Chile (11 buques), por un número indeterminado de buques palangreros que operan en el cono sur de Sudamérica, como las flotas de Uruguay, Argentina, Malvinas, y también están siendo incorporadas lentamente por la flota chilena artesanal del bacalao. Desde el punto de vista de la pesca incidental de aves marinas por la flota del bacalao que opera en Chile, las innovaciones introducidas son un gran éxito, ya que prácticamente ha desaparecido el problema de pesca incidental de aves. Por otra parte, las poblaciones del albatros de ceja negra muestran incrementos sustantivos. Por ejemplo, en Isla Gonzalo, Archipiélago Diego Ramírez, los nidos activos han incrementado desde 4.168 en 2007 a 9.164 en 2011 (datos no publicados), del mismo modo que en Isla Ildefonso y en pequeñas colonias nuevas (Moreno & Robertson, 2008). Así, las colonias del albatros de ceja negra, no solo dejaron de declinar, sino que se han incrementado en forma significativa y esto podría estar directamente relacionado con la drástica disminución de la mortalidad incidental de estas aves, que era causada por la flota palangrera original del bacalao de profundidad. Se estima que las investigaciones básicas y aplicadas relacionadas

con estas innovaciones facilitaron, en la Universidad Austral de Chile, la formación de 10-15 estudiantes de pregrado, técnicos y estudiantes de posgrado. Adicionalmente, la cooperación internacional en investigaciones sobre la pesquería del bacalao de profundidad y pesca incidental ha sido enriquecedora para Chile, en especial con investigadores de Australia y Reino Unido.

Conclusiones y recomendaciones

Los ejemplos de innovaciones pesqueras descritos muestran que las identificaciones del problema (s), observaciones sistemáticas de larga duración, procesos de experimentación básica y aplicada y, muy importante, la formación de investigadores, llevaron a diseños pesqueros novedosos y exitosos. La mejor prueba de ello es que fueron adoptados por el Estado, numerosas comunidades de pescadores artesanales (AMERB), como por parte de flotas industriales (bacalao de profundidad). En algunos casos las innovaciones dieron resultados en términos de creación de riqueza; sin embargo, en el manejo de recursos naturales renovables las innovaciones pueden ser resaltantes y no crear, al menos en el corto plazo, riqueza. Esto queda demostrado en el ejemplo de las AMERB (*i. e.*, loco), en que se innova sobre la base de una basal inicial de sobreexplotación de la biomasa pesquera. En ese punto existía alto retorno económico en el corto plazo, pero el recurso se estaba destruyendo. Así, una innovación puede ser exitosa y junto con ello disminuir el nivel de retorno económico en el corto plazo, pero debe ser evaluada en el largo plazo. Las causas detrás de los éxitos de estas innovaciones fueron el trabajo persistente en ciencias básicas y publicaciones de nivel internacional apoyado principalmente por las Universidad Católica de Chile y Universidad Austral de Chile y por instituciones del Estado como Conicyt, Fondos Regionales, Fondo de Investigación Pesquera y el Ministerio de Relaciones Exteriores. Estas instituciones aportaron fondos para investigaciones básicas y aplicadas y permitieron la conexión internacional. Adicionalmente, la cooperación internacional de largo plazo (10 años), a través de proyectos y aportes de contraparte entre la Universidad Católica de Chile y el International Development Research Center (IDRC-Canadá), fueron críticos en la implementación piloto de las AMERB en Chile. Por otra parte, los investigadores involucrados mantuvieron tasas de publicaciones elevadas, con altos índices de impacto, por extensos períodos y validaron así sus estudios a nivel nacional e internacional y formaron abundantes cuadros de investigadores jóvenes (sobre 90) de gran calidad, en áreas puramente básicas, aplicadas y técnicas. En general, las mallas curriculares de los investigadores (biólogos, biólogos marinos, técnicos marinos) jóvenes formados al alero de las innovaciones presentadas no contemplaban asignaturas amplias y de cruces de disciplinas. Por ejemplo, ninguna de las mallas contemplaba asignaturas relacionadas con aspectos de

formación en ciencias sociales, económicas o legales básicas o en temas de manejo pesquero integrado con componentes temáticos multidisciplinarios. En manejo pesquero ello es absolutamente necesario y estas asignaturas (obligatorias u optativas) deberían ser integradas en las mallas curriculares, al menos para las Licenciaturas o Títulos Profesionales de los biólogos marinos.

Los casos de innovaciones discutidos en este capítulo tienen elementos comunes resaltantes. En todos ellos, una vez detectado el problema por los científicos y realizada la ciencia básica experimental mínima, se delinearon las soluciones o innovaciones y estas se pusieron a prueba primero a nivel piloto y luego se masificaron. Además, en las fases piloto, las puestas a pruebas prácticas se realizaron en equipo, en conjunto con los usuarios, ya sea pescadores artesanales o pescadores industriales, incorporando el conocimiento local de los usuarios. Las experiencias de trabajo conjunto entre investigadores, técnicos y pescadores facilitó las transferencias de conocimientos y las implementaciones de las innovaciones. Una recomendación clave para mejorar los roles de las instituciones universitarias, del Estado o internacionales, en particular cuando se investigan problemas relacionados con sostenibilidad de recursos marinos renovables a largo plazo, es que la asignación de fondos sea realizada por períodos mínimos de 5 años. En manejo pesquero es muy difícil experimentar en terreno, y en las faenas de pesca y proyectos de menos de 5 años tienden a no generar suficiente información básica e impiden la puestas a prueba piloto de las innovaciones.

Agradecimientos

Agradecemos a las numerosas instituciones, citadas en el texto, que han aportado fondos para realizar nuestras investigaciones. Además, a la P. Universidad Católica de Chile, Universidad Austral de Chile y a la Sociedad Nacional de Pesca, Chile. JCC agradece especialmente al Centro Milenio de Biodiversidad Marina, ECIM, Las Cruces (Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, Chile).

Literatura citada

- ASHFORD, J. R., CROXALL, J. P., RUBILAR, P. S. y MORENO, C. A. (1995) Seabird interactions with long-lining operations for *Dissostichus eleginoides* around South Georgia. CCAMLR Science 2: 111-121.
- BRANCH, G. M y MORENO, C. A. (1994) Intertidal and subtidal grazers In: Rocky Shores, Exploitation in Chile and South Africa. W. R. Siegfried (Ed.), Springer Verlag, pp. 75-100.
- CASTILLA, J. C. (1990). Clase Magistral: Importancia y proyección de la investigación en Ciencias del mar en Chile. Revista Biología Marina, Valparaíso, 25(2): 1-18.

- CASTILLA, J. C. (1994a). The Chilean small-scale benthic shellfisheries and the institutionalization of new management practices. *Ecology International Bulletin* 21: 47-63.
- CASTILLA, J. C. (1994b). The sustainability of natural renewable resources as viewed by an ecologist and exemplified by the fishery of the mollusc *Concholepas concholepas* in Chile. En Munasinghe, M & Shearer, W. (Ed.), *Defining and measuring sustainability: the biogeophysical foundations* (pp.153-159). Washington, D.C.: World Bank.
- CASTILLA, J. C. (1996). La futura red chilena de parques y reservas marinas y los conceptos de conservación, preservación y manejo en la legislación nacional. *Revista Chilena de Historia Natural* 69: 253-270.
- CASTILLA, J. C. (1997). Chilean resources of benthic invertebrates: fishery, collapses, stock rebuilding and the role of coastal management areas and national parks. En: D. A. Hancock, D. C. Smith, A. Grant, and J. P. Beumer (Ed.), *Developing and sustaining world fisheries resources. The state of science and management. Second world fisheries congress proceedings* (pp. 130-135). CSIRO Publishing, Collingwood, Victoria, Australia.
- CASTILLA, J. C. (1999). Coastal marine communities: trends and perspectives from human-exclusion experiments. *Trends in Ecology and Evolution* 14: 280-283.
- CASTILLA, J. C. (2010). Fisheries in Chile: small-pelagics, management, rights and sea zoning. *Bulletin of Marine Science* 86(2) 221-234.
- CASTILLA, J. C. y DURÁN, L. R. (1985). Human exclusion from the rocky intertidal zone of Central Chile: The effects on *Concholepas concholepas* (Gastropoda), *Oikos* 45(3): 391-399.
- CASTILLA, J. C., BRANCH, G. y BARKAI, A. (1994). Exploitation of two critical predators: The gastropod *Concholepas concholepas* and the rock lobster *Jasus lalandii*. In: *Rocky Shores, Exploitation in Chile and South Africa*. W.R. Siegfried (Ed.), Springer Verlag, pp. 101-130.
- CASTILLA J. C, CAMPO, M. A. y BUSTAMANTE, R. H. (2007). Recovery of *Durvillaea antarctica* (Durvilleales) inside and outside Las Cruces Marine Reserve, Chile. *Ecological Applications* 17: 1511-1522.
- CASTILLA J. C. y DEFEO, O. (2001). Latin-American benthic shellfisheries: emphasis on co-management and experimental practices. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 11: 1-30.
- CASTILLA, J. C. y FERNÁNDEZ, M. (1998). Small-Scale benthic fisheries in Chile: On co-management and sustainable use of benthic invertebrates. *Ecological Applications* 8: 124 - S132.
- CASTILLA, J. C. y GELCICH, S. (2006). Chile: experience with management and exploitation areas for coastal fisheries as building blocks for large-scale marine management. In: *Scaling up marine management: the role of marine protected areas*. The World Bank Publications, Washington D.C., USA. Pp. 45-57.
- CASTILLA, J. C. y GELCICH, S. (2008). Management of the loco (*Concholepas concholepas*) as a driver for self-governance of small scale benthic fisheries in Chile. En Townsend, R, Shotton, R. & Uchida, H. (Ed.). *Case studies of industry participation in fisheries governance Fisheries Technical Paper* nº 504 (pp. 441-451). Rome, Italy: FAO.

- CASTILLA, J. C., MANRÍQUEZ, P., ALVARADO, J., ROSSÓN, A., PINO, C., ESPOZ, C., SOTO, R., OLIVA, D., y DEFEQ, O. (1998). Artisanal Caletas: as units of production and co-managers of benthic invertebrates in Chile. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (Special Publication) 125: 407-413.
- DEFEQ, O. (2011). Comanejo en pesquerías artesanales de Uruguay: De la planificación a la acción. *Boletín Informativo, DINARA, Uruguay*, pp. 3-4.
- DECRETO SUPREMO n° 203 (1991). Modifica D.S. (M) n° 806 de 1969 que destinó un sector de playa, fondo de mar y porciones de agua en Caleta Quintay en favor del Ministerio de Agricultura para el Servicio Agrícola y Ganadero.
- DURÁN, R. L. y J. C. CASTILLA. (1989). Variation and persistence of middle rocky intertidal community of Central Chile with and without human harvesting. *Marine Biology* 103: 555-562.
- GELCICH S, FERNÁNDEZ M., GODOY N., CÁNEPA A., PRADO, L. y CASTILLA J. C. (2012). Territorial User Rights for Fisheries as Ancillary Instruments for Marine Coastal Conservation in Chile. *Conservation Biology* 26(6): 1005-1015.
- GODOY, C. y MORENO, C.A. (1989). Indirect effects of human exclusion from the rocky intertidal in southern Chile: a case of cross-linkage between herbivores. *Oikos*. 54 : 101 - 106.
- HARDIN, G. (1968). The Tragedy of the Commons. *Science* 162 (3859): 1243-1248
- HILLBORN, R. y HILBORN, U. (2012). Overfishing: what everyone needs to know. (pp.149). New York, U.S.A.: Oxford University Press.
- HUCKE-GAETE, R., MORENO, C. A. y ARATA, J. (2004). Operational interactions of sperm whales and killer whales with the Patagonian toothfish industrial fishery off southern Chile. *CCAMLR Science*, 11: 127-140.
- LEY GENERAL DE PESCA Y ACUICULTURA n° 18.892 (1992). Gobierno de Chile. Decreto Supremo n° 430 publicado en Diario Oficial 21 de enero 1992.
- McCLANAHAN, T. y CASTILLA, J. C. (2007). Healing Fisheries. En: *Fisheries Management: Progress toward sustainability* (pp. 305-326). McClanahan, T. & Castilla, J. C. (Eds.) Blackwell publishing.
- MELVIN, E.F., SULLIVAN, B., ROBERTSON, G., y WIENECKE, B. (2004) A review of the effectiveness of streamer lines as a seabird by-catch mitigation technique in longline fisheries and CCAMLR Streamer line requirements. *CCAMLR Science* 11: 189-201.
- MORENO, C. A. (2001) Community patterns generated by human harvesting on Chilean shores: a review. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater ecosystems*. 11: 19-30.
- MORENO, C. A., ARATA, J. A., RUBILAR, P., HUCKE-GAETE, R. y ROBERTSON, G. (2006) Artisanal longline fisheries in southern Chile: lessons to be learned to avoid incidental seabird mortality. *Biological Conservation*. 127 (1): 27-36.
- MORENO, C. A., GODOY C. y VILLOUTA, E. (1987). Explotación de recursos bénticos litorales: una alternativa derivada de la protección de áreas. En P. Arana "Manejo y Desarrollo Pesquero". Libro Escuela de Ciencias del Mar. Universidad Católica de Valparaíso , pp: 51-58.
- MORENO, C. A., SUTHERLAND, J. P. y JARA, F. H. (1984). Man as a predator in the intertidal zone of southern Chile. *Oikos* 42: 155-160.

- MORENO C. A., CASTRO, R., MUJICA, L. J. y REYES, P. (2008). Significant conservation benefits obtained from the use of a new fishing gear in the Chilean Patagonian tooth fish fishery (*Dissostichus eleginoides*). CCAMLR Science 15: 79-91.
- MORENO, C. A., VEGA, R., ROBERTSON, R. y LUNA, G. (2007) Informe Final, Proyecto FIP 2006-30. Subsecretaría de Pesca.
- MORENO, C. A y ROBERTSON, G. (2008). Cuántos albatros de ceja negra, *Thalassarche melanophrys* (TEMMINCK, 1828), anidan en Chile? Anales Instituto Patagonia (Chile); 36(1) : 89-91.
- NAVARRETE, S. A, GELCICH, S. y CASTILLA, J. C. (2010). Long-term monitoring of coastal ecosystems at Las Cruces, Chile: Defining baselines to build ecological literacy in a world of change. Revista Chilena de Historia Natural 83: 143-157.
- PEÑA-TORRE, J. (1997). The political economy of fishing regulation: The case of Chile. Marine Resource Economics 12: 253-280.
- SCHURMAN, R. (1996). Snails, South Hake and sustainability: Neo-liberalism and natural resources in Chile. World Development 24:1695-1709.
- SUBSECRETARÍA DE PESCA (2010). Cuota global de captura de bacalao de profundidad (*Dissostichus eleginoides*) en la unidad de pesquería, año 2011 (pp. 25). Informe Técnico (R. Pesq.) n° 98 - 2010.

Figuras

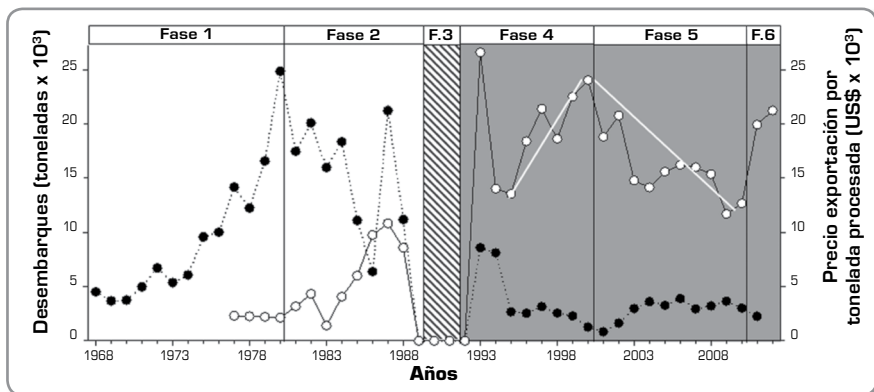


Figura 1: Desembarques de locos en toneladas métricas, con concha, para Chile entre 1968- 2012 (círculos negros), y valorizaciones en dólares americanos nominales por tonelada exportada de locos procesados (círculos blancos). Las fases 1 y 2 corresponden a pesquerías de locos con acceso abierto, antes de la implantación de la veda total de extracción por cuatro años. La fase 3 corresponde a la veda total de extracción de locos los años 1989-1992 (achurado). Las fases 4-6 corresponden al período posveda y ya con el instrumento de comanejo de las AMERB de la Ley de Pesca de 1991.

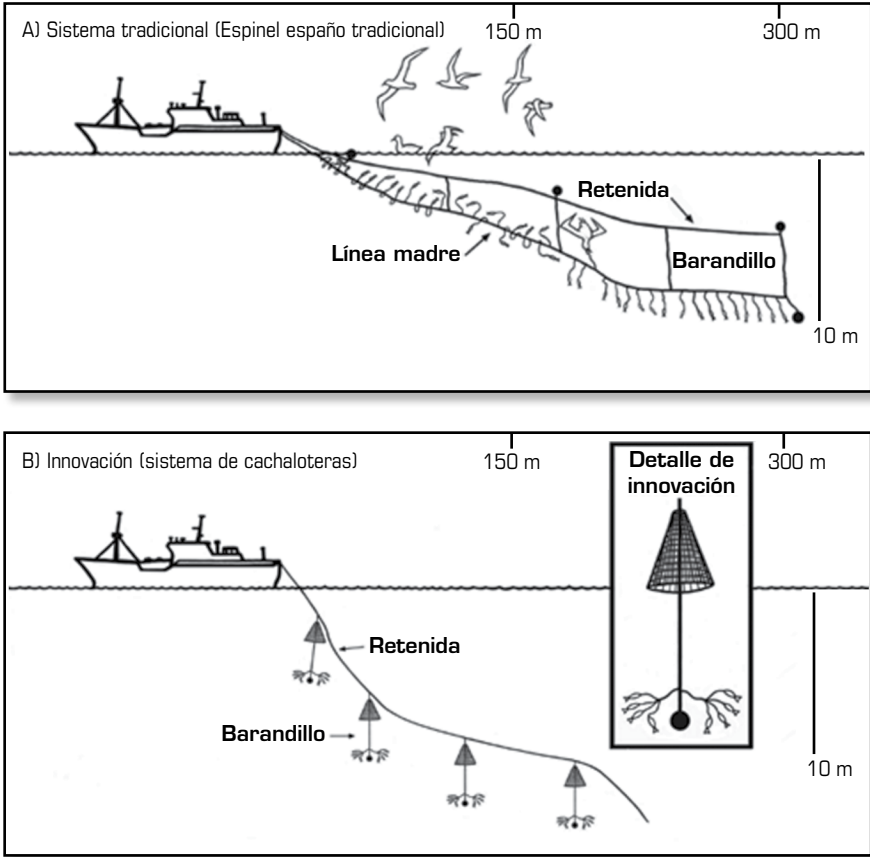


Figura 2: Pesquería de palangre (arte de pesca con serie de espineles) del bacalao de profundidad, *Dissostichus eleginoides* en Chile. A. Sistema de pesca tradicional de palangre español, que causa mortalidad incidental de aves marinas. B. Innovaciones en el arte, con concentración de los anzuelos en racimos con un peso agregado que facilita su rápido hundimiento y evita la muerte incidental de aves, y adicionalmente de un cono de red ("cachalotera") que se desplaza a lo largo de la línea y protege al pez capturado, haciendo más difícil su ataque y remoción por parte de cachalotes y otros mamíferos e incrementa la pesca.

Información técnica del proyecto

Innovaciones en manejo pesquero y conservación en Chile

Financiamiento	Fuentes	CONICYT, FIP, IDRC-Canadá, PUC, UACH
	Montos	ca. US\$ 1.200.000
Tiempo involucrado (desde la idea a la innovación)	Entre 10-12 años en total para los ejemplos de innovación	
Patentes o registros de protección industrial (INDICAR QUÉ TIPO DE PROTECCIÓN SE REALIZÓ)	Solicitudes (n° de solicitudes)	Nacionales: No
		Internacionales: No
	Concesiones (n° de Patentes)	Nacionales: No
		Internacionales: No
Investigadores/gestores	2 investigadores/gestores principales y ca. 25 personal especializado (ayudantes, co-invest,), sin tomar en cuenta a los más de 80-90 estudiantes formados	
Industria que adoptó la innovación	Empresas pesqueras españolas y chilenas del Bacalao de profundidad. Más de 700 comunidades de pescadores artesanales de Chile (unos 20.000 a 25.000 pescadores Indicar empresa(s)	
Inversión en la innovación	Muy difícil de calcular por el tipo de innovaciones: Muchos de los aportes fueron en horas de embarcación, buceo, uso de botes, experiencias de repoblación, etcétera.	

Desarrollo de inmunoterapia celular para el tratamiento del cáncer

Mario Roseblatt (Coordinador),
Fundación Ciencia & Vida, Santiago, Chile.

Alberto Fierro,
Clínica Las Condes, Santiago, Chile.

Jorge Martínez,
Laboratorio de Biología Celular, INTA, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Flavio Salazar,
Facultad de Medicina, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Andrés Stutzin,
Facultad de Medicina, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Resumen

A nivel global, el cáncer constituye la segunda causa de muerte después de las enfermedades cardiovasculares. En las décadas venideras, en la medida que la expectativa de vida se siga prolongando, persistan los factores de riesgo externos que determinan la enfermedad y se profundice el nivel de diagnóstico actual, esta realidad no sufrirá modificaciones.

En este contexto, la innovación que presentamos en este capítulo se centra en el desarrollo de la tecnología de terapia celular para el tratamiento del cáncer desarrollada por el Dr. Flavio Salazar y su grupo de investigadores de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile, en un proyecto en el cual interactúan científicos básicos con médicos oncólogos. El objetivo principal ha sido la creación y elaboración de productos inmunoterapéuticos para el tratamiento del melanoma maligno con una proyección global. Su base científica se sustenta en la preparación

de células dendríticas a partir de precursores extraídos de la sangre de pacientes con melanoma, las que, luego de ser cargadas con péptidos derivados de melanomas humanos, son administradas al mismo paciente con el fin de generar una respuesta inmune específica contra el tumor. Los investigadores designaron estas células con el nombre de TAPCells, de Tumor Antigen-Presenting Cells.

La concepción original del proyecto ha significado un importante avance en el conocimiento y aplicación de la inmunoterapia para el tratamiento de enfermedades oncológicas, y adicionalmente para enfermedades autoinmunes. Además de resultar en un tratamiento efectivo para el melanoma y otros tipos de cáncer como el de próstata, el proyecto ha conducido a la capacitación de un importante número de jóvenes científicos, derivando en la creación de una empresa nacional —Oncobiomed S.A.—. Esta empresa cuenta con un flujo propio de ingresos producto de venta de servicios, ingresos que, junto con fondos estatales (Corfo), permiten su actual funcionamiento, con una proyección de autosustentación en el futuro cercano.

El programa, iniciado hace más de 10 años por este grupo de investigadores, incorpora un importante grado de originalidad en el desarrollo de la idea al usar tecnología propia, con solicitudes de patentes en Chile, Australia, Canadá, Israel, Nueva Zelanda, Estados Unidos, México, Brasil y Argentina. Su financiamiento inicial proviene de fondos públicos (Fondef) con una subvención total aproximada de \$900 millones y de Corfo a Oncobiomed, de aproximadamente \$600 millones.

Esta iniciativa ha resultado en importantes beneficios terapéuticos y económicos. Oncobiomed estableció una clínica para el tratamiento de pacientes con melanoma avanzado que a la fecha ha beneficiado a más de 250 pacientes. Actualmente está valorada en \$5.000 millones y sus retornos económicos han sido reinvertidos en el proyecto, en el tratamiento gratuito de algunos pacientes y en transferencia tecnológica. El costo por paciente alcanza a \$3 millones (10 veces menos que en USA), costo que es parcialmente cubierto por algunas isapres. El beneficio económico, calculado en aumento de productividad y ahorro en gastos de salud, se calcula en \$450 millones/año para el mercado nacional y un valor proyectado para el mercado internacional de USD 600 millones.

PARTE I: La nueva frontera en el tratamiento del cáncer

La innovación en medicina. Una vía en construcción.

El origen del concepto de “innovación” se debe al economista Joseph Alois Schumpeter (Schumpeter, 1934), quien señalara que la innovación es la imposición de una novedad técnica u organizacional en el proceso

de producción y no un simple invento. Una definición más moderna señala que innovación es “el proceso de desarrollo e implementación de nuevos modelos de negocios, aplicaciones, actividades, procesos o productos para la creación de valor”. No debe, por tanto, confundirse innovación con invención.

La aplicación de estas definiciones en el campo de la salud implica dos conceptos. Por un lado, hace referencia a la creación de un producto cualitativamente nuevo, y por otro, su uso debe traducirse en la creación de valor, es decir, debe tener rentabilidad económica o social.

Innovaciones recientes en el área biomédica cubren un espectro importante de aplicaciones, desde la obtención de imágenes por tomografía axial computarizada y resonancia nuclear magnética al uso de medicamentos biológicos tales como factores de crecimiento, análogos de proteínas como la eritropoyetina, inhibidores de la recaptación de serotonina para el tratamiento de la depresión, tecnología para el tratamiento quirúrgico de las cataratas e implantes de lentes, etc. Estas innovaciones son parte de un mercado global de enorme magnitud. La industria farmacéutica —por ejemplo— alcanzó el año 2011 un tamaño global de 955.000 millones de dólares y su tasa de crecimiento anual compuesto para los próximos años se estima en 3-6 (IMS Institute for Health Care Informatics 2012). La participación de América Latina en ese mercado es de solo un 7 %, pero con una tasa de crecimiento anual estimada al año 2016 de 10-13%.

Dado el enorme volumen del mercado de la salud, la tendencia dominante será el remplazo de productos de marca por productos genéricos, un crecimiento sostenido en productos que enfrentan enfermedades de alto costo y productos innovadores que agreguen nuevas opciones de tratamiento. Las estimaciones recientes indican que en las áreas de oncología, diabetes, esclerosis múltiple y VIH se esperan tasas de crecimiento global superiores al 10 %. Así, en el ámbito diagnóstico y terapéutico las posibilidades de innovación son múltiples y variadas. A modo de ejemplo, podemos citar:

- La introducción de conectividad de alta velocidad y programas informáticos que permitan la monitorización directa del paciente en tiempo real, el acceso expedito a la historia clínica y exámenes, ayuda diagnóstica, dosis e interacciones medicamentosas, incluyendo la oportunidad de reducir errores de prescripción.
- La terapia celular utilizando células troncales intactas o inducidas que ejerzan funciones tejido-específicas y que permitan intervenir en casos de enfermedades de altísimo impacto social, como la diabetes mellitus, la insuficiencia cardíaca, la insuficiencia renal, el cáncer y enfermedades del sistema inmune.
- El diagnóstico y terapia génica que permiten en la actualidad identificar factores de riesgo e intervenir para evitar una enfermedad antes de que esta se haga presente.

El campo de la salud pública también es objeto potencial de innovación. De hecho, en nuestro país ello se ha producido con reconocido éxito. La introducción efectiva de medicina preventiva y el logro de metas como la sobrevida libre de enfermedad parecieran estar al alcance de nuestras posibilidades. El acceso a medicamentos genéricos —con demostración de bioequivalencia— también abre la oportunidad para que estos sean producidos en Chile y se pongan a disposición de un mayor número de pacientes potenciales.

No obstante la trascendencia para el bienestar de la población así como de la creación de valor de la innovación en salud, la concreción de estas innovaciones no está libre de dificultades. El pasado de nuestro país registra —con la notable excepción de la creación e implementación del Servicio Nacional de Salud— escasos ejemplos de innovación exitosa en el ámbito de la salud. Otra dificultad significativa tiene que ver con el hecho de que la aplicación de innovaciones diagnósticas o terapéuticas conlleva la realización de pruebas clínicas de altísimo costo y de larga duración, incluyendo evaluaciones de eficiencia y seguridad en el mediano y largo plazo. Finalmente, la investigación en seres humanos ha sido objeto de una sostenida discusión ante los nuevos dilemas éticos que plantea la biomedicina, como es el trabajo con células troncales o la masiva utilización de la información genética.

Mecanismos de estímulo a la innovación en Salud

En nuestro país, el esfuerzo de financiar la investigación en salud recae fundamentalmente en el Estado a través de instrumentos inespecíficos de apoyo a la ciencia. En la actualidad, la investigación científica asociada a temas vinculados con la salud humana está casi fundamentalmente financiada por Conicyt a través de sus programas Fondecyt, Fondef y Fonis. Solo en los últimos años fondos públicos derivados de otras instituciones (como Corfo) han financiado algunos proyectos en el área. Por su magnitud y persistencia, esa iniciativa aún no constituye una tendencia.

El análisis de los fondos adjudicados anualmente por los programas Fondecyt y Fondef indica que entre el 10 y el 12 por ciento de los proyectos adjudicados corresponden a temas vinculados a la salud. El programa Fonis es un caso digno de mención. Fue creado el año 2004 por una iniciativa conjunta del Ministerio de Salud y Conicyt, con el propósito de generar conocimiento científico que sustente la aplicación de políticas públicas en salud. Lamentablemente, el programa dispone de un presupuesto menor que no permite el desarrollo de proyectos de envergadura. No existen en Chile instituciones públicas o privadas que financien específicamente investigación en salud como ocurre en otros países (EE. UU., Reino Unido o Francia). A pesar de la escasa coordinación entre los entes que financian la innovación en Chile y la poca preparación de las instituciones de enseñanza superior que se ocupan del tema, el sistema

fue capaz, en un plazo de 10 años, de respaldar la creación de la empresa Oncobiomed, cuyo producto principal es el desarrollo de una vacuna contra el melanoma con una inversión total cercana a los dos millones de dólares. Si bien este es un ejemplo que claramente puede ser catalogado de exitoso, no es menos cierto que su desarrollo institucional fue excepcional y amerita un comentario.

El singular caso de Oncobiomed permite identificar los principales elementos que impulsan el proceso innovador: (i) la existencia de una idea innovadora respaldada por sólida evidencia científica; (ii) la generación de incentivos académicos y económicos que promuevan el impulso innovador (este es un punto particularmente sensible, dado que un porcentaje significativo de los investigadores activos del país labora en universidades que no han desarrollado plenamente una metodología de trabajo que genere incentivos); (iii) el respaldo institucional de los organismos del Estado que generen políticas de Estado de largo plazo que permitan el financiamiento de proyectos innovadores, y (iv) el interés por parte del sector empresarial por arriesgar capitales en empresas riesgosas. El conjunto de estos elementos se da en nuestro país de modo muy ocasional. Es muy frecuente que buenas ideas no progresen hacia la generación de productos porque algún eslabón de la cadena mencionada no esté presente a la hora de concretarse una iniciativa particular. Pero eso no es todo. No es claro que en el país actual se promueva, desde la educación básica en adelante, el desarrollo de la curiosidad como valor formativo. Se requiere de un cambio cultural que promueva el valor de las preguntas y provea de mecanismos institucionales que no frustren este esfuerzo, y permitan sumar el progreso científico a nuestro incipiente desarrollo económico.

Optimismo desde el sistema inmune

El cáncer a la piel es uno de los tipos de cáncer cuya incidencia ha mostrado a nivel mundial un mayor aumento, alcanzando en la actualidad una cifra de 2,4 millones de personas afectadas (<http://www.melanoma.org>). En Chile, en los últimos 20 años, la incidencia de este cáncer casi se duplicó (Vallebuona, 2011). Los casos tratados precozmente mediante cirugía tienen una buena posibilidad de evolucionar positivamente; sin embargo, luego de desarrollada una metástasis, los tratamientos tradicionales (cirugía o quimio y radioterapia) resultan ineficaces. De ahí la necesidad de profundizar en la investigación de nuevas aproximaciones —como la inmunoterapia—, que ha generado tratamientos celulares con células dendríticas, —también conocida como “vacuna celular”, una de las tecnologías con más promisorias aplicaciones terapéuticas.

Las células dendríticas son células del sistema inmune especializadas en mostrar antígenos foráneos a los linfocitos T, y así inducir por parte de los linfocitos T citotóxicos una respuesta inmune específica contra el

antígeno foráneo. En el caso del melanoma, las células dendríticas presentarían antígenos provenientes de las mismas células transformadas a los linfocitos T citotóxicos, los que, luego de activarse, terminarían por eliminar las células malignas. Dado que el sistema inmune discrimina entre lo propio y lo ajeno y las células tumorales no son desde el punto de vista antigénico significativamente distintas a las normales, muchas de las células cancerosas no son reconocidas como extrañas evadiendo su efecto, generando tolerancia y permitiendo la propagación del cáncer. El desafío ha sido, por tanto, mejorar la respuesta del sistema inmune del propio paciente usando sus propias células del sistema inmune, entre las que se encuentran las llamadas células “Natural Killers”, los linfocitos T citotóxicos o las propias células dendríticas (Salazar, 2000).

Los primeros intentos en usar células dendríticas para el tratamiento del melanoma avanzado fueron descritos por Nestle (1998) hace 15 años. La metodología general —aun en uso hoy en día— consistía en aislar las células dendríticas del paciente, incrementar su número en el laboratorio, manipularlas de manera de mejorar su efectividad y reintroducirlas al mismo paciente para eliminar las células tumorales. Dado que la presentación de antígenos tumorales a los linfocitos T citotóxicos es esencial para iniciar una respuesta inmune contra el tumor, la manipulación extracorpórea de las células dendríticas busca mejorar su capacidad de presentar antígenos tumorales, lo que se logra cargando estas células con antígenos del propio tumor. Los diferentes laboratorios han usado diversas preparaciones de antígenos tumorales con variados resultados en términos de eficacia, existiendo incluso algunos casos en los que la respuesta clínica ha sido claramente negativa. En este sentido, el grupo de investigadores chilenos logró optimizar este aspecto definiendo una combinación de antígenos de melanoma que mostraron una alta eficacia en la generación de una respuesta inmune contra el melanoma y una mejoría de los pacientes.

Entre los aspectos más atractivos de esta tecnología están su inocuidad y la posibilidad de aplicarla a otros tipos de cáncer. Tratamientos similares al propuesto para melanoma se han llevado a cabo en Estados Unidos y Europa para cáncer de colon, mieloma múltiple, linfoma no-Hodgkin y cáncer pulmonar, entre otros (Galluzzi, 2012). El grupo chileno ha ampliado los tratamientos a pacientes con cáncer de próstata.

El proyecto nacional ha permitido el establecimiento de una plataforma de tecnología avanzada que ha generado una empresa (Oncobiomed S.A.) que brinda servicios terapéuticos contra el cáncer. Esta empresa cuenta en la actualidad con un flujo propio de ingresos, los que, conjuntamente con fondos estatales (Corfo), permiten su actual funcionamiento, con una proyección de autosustentación en el futuro cercano. El programa científico ha generado solicitudes de patentes en Chile, Australia, Canadá, Israel, Nueva Zelanda, Estados Unidos, México, Brasil y Argentina.

A la fecha, esta tecnología se ha utilizado en más de 50 ensayos clínicos independientes en diferentes países (incluido Chile) con variados resultados.

A pesar de lo promisorio de los resultados, la variabilidad de protocolos, dosis de células dendríticas utilizadas y vías de administración, se hace difícil comparar datos de diferentes grupos o sacar conclusiones de tipo general. A nivel mundial, la tecnología tiene una eficacia de alrededor del 15 %, porcentaje que no es diferente al obtenido en pacientes tratados con regímenes de quimio o radioterapia estándar cuando se comparan sus sobrevidas, aunque la ausencia de efectos adversos de las intervenciones inmunológicas le otorgan ventaja. En Chile la eficacia de las TAPCells alcanza un 50 %. En este sentido, el futuro éxito de las células dendríticas en la terapia del cáncer dependerá de la generación de información apropiada que permita correlacionar los resultados de ensayos inmunológicos en el laboratorio con la eficacia clínica. No obstante, existen numerosos reportes que indican que la terapia con células dendríticas ha dado resultados positivos en pacientes con melanoma Tipo IV, resistente a otras terapias.

PARTE II: TAPCells® : Inmunoterapia celular hecha en Chile

Vacunas anticáncer a nivel global

La idea de que el sistema inmune puede utilizarse para eliminar tumores se remonta a casi un siglo. Existe sólida evidencia científica que indica que una de las principales funciones de este sistema es la eliminación de aquellas células transformadas que pudieran generarse en un organismo, y por tanto participar activamente en la eliminación de tumores. Esto ha quedado indirectamente sustentado en numerosos casos de regresión espontánea de tumores en pacientes que no han recibido tratamiento médico y donde se presume una participación del sistema inmune. Por otro lado, evidencia más reciente indica que los tumores tienen su propia estrategia para evitar la acción de las células del sistema inmune, favoreciendo la generación de otras células que suprimen la actividad inmunológica.

Lo anterior nos lleva a la conclusión de que debemos aumentar la investigación que nos permita entender mejor la interacción del sistema inmune con las células cancerosas. Este nuevo conocimiento permitirá avanzar en el diseño de estrategias para combatir los tumores, incluyendo, por cierto, entender el origen de la inmunosupresión provocada por el propio tumor así como el desarrollo de nuevas estrategias que permitan mejorar y orientar la respuesta del sistema inmune.

Sin duda, durante los últimos años hemos sido testigos de importantes avances en la inmunoterapia del cáncer, incluyendo el diseño de las llamadas vacunas “a la medida” contra esta enfermedad.

En esta dirección, el llamado “Grupo de trabajo en ensayos clínicos de vacunas anticáncer” (Lonchay C., 2004) ha realizado un estudio en profundidad de los diferentes ensayos a nivel mundial y ha llegado a la conclusión de que esta tecnología ofrece un promisorio futuro en el tratamiento de diferentes tipos de cáncer. En su afán por estandarizar los diferentes protocolos, el grupo ha propuesto recientemente que el diseño de los protocolos para el tratamiento de pacientes con vacunas celulares debe incluir dos etapas esenciales; una primera de “prueba de principio” y otra de ensayos de eficacia. El grupo propone que los estudios deben incluir al menos a 20 pacientes de una población bien definida y lo más homogénea posible. También manifiesta como deseable que la enfermedad no se encuentre en una etapa de progreso demasiado rápido con el fin de dar tiempo a la vacuna para inducir una respuesta inmune efectiva. Los estudios deben focalizarse en la determinación de la dosis apropiada de células dendríticas y una adecuada planificación temporal del tratamiento. La actividad inmunológica debe ser comprobada previamente y a distintos tiempos de tratamiento mediante dos tipos de ensayos de laboratorio diferentes, que sean reproducibles entre sí. Los ensayos de eficacia deben demostrar formalmente los beneficios clínicos. El seguimiento de estos simples principios debería llevar a un mejoramiento en los resultados.

A pesar de los obstáculos, el campo de las vacunas celulares, en especial para el tratamiento de melanoma, continúa progresando. Existe un renovado interés comercial en este desarrollo y varias empresas han surgido en distintos países. Oncobiomed S.A. es el ejemplo chileno. Muchas de estas compañías se encuentran aún en etapas de desarrollo de laboratorio, mientras que otras llevan a cabo ensayos clínicos, algunos en Fase I, Fase I/II e incluso en III (Tabla 1). El desarrollo futuro debe, sin embargo, considerar los altos costos que significa la terapia celular personalizada. La preparación de vacunas celulares de alta calidad, que cumplan con las normas de “Buenas Prácticas de Manufactura”, es un procedimiento laborioso y de alto costo que requiere de salas limpias (GMP) de dedicación exclusiva. Además, las técnicas de cultivo de células dendríticas para un paciente requieren de personal altamente especializado y de varios días de trabajo; esto, sin considerar los costos de materiales, medios de cultivo y citoquinas. Todo lo anterior, más el inconveniente de preparar la vacuna de forma individual para cada paciente, podría llevar a pensar que no habría interés comercial en desarrollar estos sistemas. Sin embargo, como se deduce del análisis de la Tabla 1, son numerosas las compañías que en diferentes países han entrado en este campo de desarrollo y que intentan obtener la aprobación de sus innovaciones. Así, el crecimiento de la industria de las vacunas celulares se ha visto potenciado por informes de analistas del mercado de la salud de los Estados Unidos que advierten de un sustancial crecimiento de este mercado con una cantidad importante de “nuevos productos” en la línea de producción (Doyle, 2012). Según este informe, se espera que un

número importante de nuevos tratamientos lleguen al mercado, con un crecimiento agregado al año 2018 cercano al 78 %. La línea de producción de vacunas profilácticas y terapéuticas está incorporando al mercado vacunas más seguras y con mejores niveles de tolerancia. Esto, junto al uso combinado con otras terapias (quimioterapia, radioterapia, cirugía), ofrece grandes promesas tanto a los pacientes como a las empresas farmacéuticas. De acuerdo a los cálculos de este análisis, el mercado de las vacunas celulares terapéuticas para distintos tipos de cáncer crecería de forma explosiva desde un valor de USD 48 millones en 2010 a USD 4.848 millones al año 2018.

Los buenos resultados obtenidos hasta la fecha, que se reflejan en una mejor sobrevida de los pacientes, y las excelentes perspectivas económicas para las empresas farmacéuticas que ofrece la tecnología son la principal fuerza para una continua innovación en el área. Nuevas investigaciones se necesitan para lograr identificar los mejores antígenos tumorales para “cargar” las células dendríticas, incluyendo mezclas de antígenos, y mejorar su capacidad para estimular el sistema inmune.

No obstante los importantes avances que se han logrado con esta tecnología, aún quedan preguntas básicas que responder respecto de la interacción entre el sistema inmune y el cáncer, y sobre la biología de la captación y presentación de antígenos por parte de células dendríticas, incluyendo estudios que ayuden a definir el papel que juegan los diferentes subgrupos de células dendríticas en este proceso (Figdor, 2004). Nuevas tecnologías están naciendo del nuevo conocimiento alcanzado, entre las que encontramos nuevos sistemas de imagenología para seguirles la pista a las células dendríticas y a los linfocitos T citotóxicos dentro del organismo de los pacientes, y así visualizar *in situ* la interacción entre el sistema inmune y los tumores. También se están realizando nuevos esfuerzos con el fin de aprender más sobre los mecanismos que utilizan los tumores para evadir la respuesta inmunológica. Este conocimiento debería llevarnos a encontrar nuevas drogas que permitan bloquear los mecanismos de evasión, mejorando así la efectividad de la terapia con células dendríticas. Por ejemplo, los últimos descubrimientos han mostrado que las células del tumor producen mensajes que atraen hacia éste células supresoras de la respuesta inmune (linfocitos T reguladores). La terapia celular, en combinación con una droga que inhiba la secreción por parte del tumor de estos factores de atracción de linfocitos inhibidores, mejorará sin duda la efectividad de la terapia celular.

En resumen, la terapia con células dendríticas ha demostrado ser una innovación significativa para el tratamiento del melanoma y otros tipos de cáncer, con notable mejoría para los pacientes. Esto ha suscitado un especial interés de la industria farmacéutica gracias a su enorme potencial económico tanto en Chile como a nivel mundial, originando nuevas investigaciones que sin duda incorporarán nuevas drogas al arsenal en el combate contra el cáncer.

El esfuerzo chileno

A pesar de que bajo el principio de la inmunoterapia autóloga resultaba sugerente utilizar proteínas obtenidas del propio tumor del paciente como antígenos para “cargar” las células dendríticas, estos procedimientos adolecen de múltiples problemas. Entre los más usados en la inmunoterapia contra el melanoma, podemos mencionar los esfuerzos para identificar los mejores antígenos que desencadenarán una respuesta inmune. A la fecha, se han utilizado antígenos de melanoma preparados de diversas fuentes: proteínas, péptidos, virus modificados o genes codificantes de estas mismas proteínas. Sin embargo, las células dendríticas cargadas con estos antígenos han mostrado ser poco eficientes en presentar estos antígenos a las células del sistema inmune y, por tanto, poco efectivas en los ensayos clínicos. Otros grupos han usado células dendríticas cargadas con antígenos derivados de las propias células tumorales del propio paciente, tecnología que tiene como limitante principal la cantidad restringida de muestras tumorales. Adicionalmente, esta tecnología tiene dos limitaciones adicionales: en primer lugar está limitada al uso de proteínas derivadas de tumores operables por cirugía y en segundo, debe ser efectiva también en un tumor secundario, el que puede mostrar una gran diversidad respecto del primario. Al final, la metástasis a distancia, es, en definitiva, el elemento desencadenante del desenlace fatal. De ahí que cargar las células dendríticas con proteínas que provienen del tumor primario podría ser irrelevante.

Por otra parte, existe una dificultad adicional que se refiere a la necesidad de obtener una cantidad suficiente de células dendríticas del mismo paciente susceptibles de ser “cargadas” con antígenos tumorales a partir del escaso número de ellas que se encuentran en la sangre.

El grupo del Dr. Salazar resolvió estas dificultades utilizando dos técnicas exclusivas.

La primera innovación generada por el grupo local consiste en el desarrollo de una batería antigénica genérica derivada de líneas celulares humanas disponibles comercialmente, las que, además, provienen de metástasis y ofrecen un repertorio antigénico muy variado (, 2011). Mediante esta tecnología, los científicos de Oncobiomed lograron independizar el tratamiento de la disponibilidad de células tumorales del propio paciente. Este preparado celular genérico (equivalente a un programa de código abierto en el mundo del software) no requiere de la presencia del tumor del enfermo para la fabricación de la vacuna. Los resultados obtenidos por Oncobiomed muestran que células dendríticas cargadas con este producto, denominado Trimel por el grupo del Dr. Salazar, incluyen todos los elementos necesarios para inducir en el paciente una vigorosa respuesta inmune, estimulando el reconocimiento y destrucción tanto de los tumores como de los focos metastásicos del paciente. Esta innovación coloca a esta tecnología en una perspectiva única de uso universal y que, por lo tanto, puede ser más fácilmente industrializada a escala global.

La segunda tecnología desarrollada por este grupo consiste en un método rápido para la preparación de células dendríticas capacitadas para capturar y presentar los antígenos tumorales a los componentes efectores de la respuesta inmune (Aguilera, 2011). Tomando como punto de inicio una población de células más comunes y abundantes de la sangre —los monocitos—, el grupo de Oncobiomed logró mediante técnicas de cultivo celular y uso de factores de crecimiento celular llamados citoquinas y del anteriormente mencionado Trimel, la preparación de células presentadoras de antígeno a partir de los monocitos obtenidos de la sangre del propio paciente en un tiempo de alrededor de 24 horas. Estas células son posteriormente sometidas a ciertos procesos de activación celular adicionales que permiten que las células dendríticas así obtenidas aumenten su potencia inductora de la respuesta inmune antitumoral. Esto de por sí es una gran ventaja sobre otros métodos que utilizan precursores de células dendríticas obtenidos desde la sangre y que demoran entre 5 y 7 días en generar un número suficiente de estas células.

Estos dos procesos son la clave de la innovación de Oncobiomed, ya que convierten estos monocitos —notoriamente más abundantes que los precursores usados por otros grupos— en verdaderas células presentadoras de antígenos con capacidades similares a las mostradas por las células dendríticas. Estas células denominadas TAPCells por sus siglas en inglés (Tumor Antigen-Presenting Cells) son reinyectadas en los pacientes de manera subcutánea para generar una respuesta inmune que se ha demostrado activa específicamente en las llamadas “células asesinas” de tumores. Estas células asesinas reconocen a las células tumorales del paciente y provocan su destrucción (Figura 1). Este procedimiento y sus componentes se encuentran protegidos por una solicitud internacional de patente (Salazar, 2008), la que ya ha sido otorgada en Australia, Nueva Zelanda y México.

Los avances tecnológicos logrados por el equipo del Dr. Salazar, Trimel y TAPCells, permiten concebir que lo alcanzado por este grupo representa una opción insuperable de comercialización tanto a nivel local como mundial (Orellana, 2003).

Los principales resultados comunicados por el grupo nacional han sido obtenidos precisamente de pacientes portadores de un melanoma maligno en etapa IV, aunque también se incluyeron algunos en etapa III. Ambas condiciones clínicas son consideradas inoperables y las posibilidades de la quimio o radioterapia son muy limitadas. Existe acuerdo en que la sobrevida de pacientes con este grado de enfermedad y con metástasis a distancia es de 8 a 10 meses. A la fecha, los autores han documentado tratamientos a 250 pacientes con melanoma maligno grado IV, obteniéndose respuesta inmunológica a la inyección con TAPCells en el 60 por ciento de los casos y un incremento en la mediana de sobrevida a 33 meses en el grupo en el que se obtuvo respuesta inmune (Figura 2) (López, 2009).

Los resultados de las pruebas clínicas realizadas hasta la fecha y que han sido comunicados en revista de primera línea de la investigación oncológica como *Journal of Clinical Oncology*, *Clinical Cancer Research*, *Clinical Experimental Immunology* y *Cancer Immunology and Immunotherapy*, entre otras, pueden resumirse de la siguiente manera:

- En general, la mayoría de los pacientes han mostrado molestias menores, tales como leve alza de temperatura o dolor en la zona de la inyección. Algunos han manifestado una pérdida de pigmento en la piel (vitiligo), como resultado de una respuesta positiva al tratamiento.
- Aproximadamente un 60 % de los pacientes en etapa IV de la enfermedad han mostrado una reacción del tipo hipersensibilidad retardada (DTH, por sus siglas en inglés) positiva contra el melanoma.
- Un aumento de la sobrevida del grupo DTH positivo a una mediana de 33 meses, comparado con una mediana de 10 meses en pacientes con melanoma avanzado (Figura 2).
- Diez pacientes en etapa IIIC tratados han permanecido libres de regresión después de 5 años de seguimiento, comparado con una recurrencia y muerte antes de 24 meses en cerca del 70 % de los pacientes con otros tratamientos.

Oportunidades de la innovación y creación de valor

A partir de los avances logrados por el Dr. Flavio Salazar y su grupo de investigadores, nació en el año 2002 la empresa de I+D, Oncobiomed. Según la monografía de la propia empresa, está orientada a “desarrollar, comercializar, transferir y licenciar tecnologías asociadas a la prevención, diagnóstico y tratamiento del cáncer”, y está integrada por académicos e investigadores de la Universidad de Chile y otros profesionales expertos en el área de negocios. El trabajo de este grupo de investigadores ha logrado formalizar una empresa en la cual se conjugan los aspectos científicos, tecnológicos, comerciales y legales, apoyados en sólidas publicaciones científicas y concretos resultados clínicos, y resguardados a nivel mundial por una patente (PCT/EP2008/062909).

El financiamiento inicial de la empresa provino del Estado, a través de Fondef (\$900 millones) y de Corfo (\$600 millones). Actualmente la empresa está valorada en aproximadamente \$5.000 millones y ha establecido una clínica para el tratamiento de pacientes con melanoma avanzado. Estos innovadores tratamientos han beneficiado a más de 250 pacientes y sus retornos económicos han sido reinvertidos en el proyecto, en el tratamiento gratuito de algunos pacientes y en transferencia tecnológica. El costo por paciente alcanza a \$3 millones (10 veces menos que en USA), costo parcialmente cubierto por algunas isapres. El beneficio económico, calculado en incremento en los años de vida, aumento de productividad y ahorro en gastos de salud, se calcula en \$450 millones/año para el mercado nacional y un valor proyectado para el mercado internacional de USD \$600 millones.

Esta empresa, en consorcio con la Universidad de Chile, es propietaria de la tecnología TAPCells + Trimel, anteriormente descrita, contra el melanoma maligno y otros tipos de cáncer. Además de una dinámica línea de investigación en terapia celular, Oncobiomed cuenta con un centro especializado en el sector oriente de Santiago, donde ofrece tratamiento clínico de inmunoterapia para el melanoma, cáncer de próstata y de colon. Adicionalmente, la empresa ha extendido su línea comercial desarrollando otras tres líneas de negocio, como son el licenciamiento de la tecnología TAPCells/Trimel; la entrega a otros centros terapéuticos de la franquicia de la tecnología y una línea de producción de vacunas celulares.

El cáncer representa una de las principales causas de muerte a nivel mundial. En Chile se producen sobre 20.000 decesos anualmente solamente por esta enfermedad, con una incidencia creciente del melanoma maligno. Para este último, las terapias de uso convencional poscirugía, como son la quimioterapia basada en dacarbazina y la radioterapia, muestran una muy baja eficacia. Otros tratamientos no ambulatorios utilizan citoquinas como la interleuquina-2 (IL-2 o Proleukin), cuyo costo para un tratamiento convencional alcanza valores por sobre los US\$10.000, o el Interferón alfa 1b, cuyo costo también llega a los US\$10.000, con una baja eficacia y altos efectos colaterales adversos. A nivel internacional, un tratamiento avanzado supera los US\$ 30.000, sin asegurar una mejoría sustantiva.

Para otros tipos de cáncer, como los de próstata o colon, la tecnología desarrollada por Oncobiomed representa una excelente alternativa tanto en costo como en efectividad con la quimio y radioterapia poscirugía, especialmente antes de la recurrencia. En estas enfermedades el tratamiento aconsejado hoy en día es cirugía seguida de quimioterapia, lo que tiene un costo aproximado de \$10 millones. Sin embargo, luego del período de recuperación de entre uno a dos años, el 70 % de los pacientes sufre una recidiva. No obstante, esta manifestación puede ser minimizada si durante el período de recuperación se utiliza la terapia celular con TAPCells desarrollada por Oncobiomed.

En resumen, sobre la base de los datos disponibles respecto del costo y efectividad de las terapias comúnmente aceptadas, y la convicción de que el cáncer además de representar un profundo drama humano significa una catástrofe económica para el paciente, su familia y la sociedad, es que el tratamiento implementado por Oncobiomed ha mostrado en la práctica terapéutica una alta eficiencia curativa y una atractiva relación precio/calidad. Esto permite avizorar el remplazo de los tratamientos convencionales, que son no solamente de alto costo, sino que además de baja eficacia y con severos efectos secundarios, por una inmunoterapia cuyas ventajas han sido demostradas en la praxis médica.

En consideración a las ventajas curativas y de costo de la inmunoterapia desarrollada por Oncobiomed, las ventajas de la tecnología —aparte

del beneficio directo a los pacientes— conducen a varios negocios adicionales, como los beneficios que pueden derivar en la venta o licenciamiento de los derechos a terceros, o el usufructo del sublicenciamiento de la tecnología a centros especializados, particularmente en Latinoamérica. Fuera de ello, Oncobiomed proyecta implementar otros servicios, como la fabricación y venta de la tecnología TAPCells a los centros terapéuticos que hayan asumido la franquicia.

Desde la perspectiva de uso de la tecnología a nivel mundial, la Fase clínica II realizada en Chile (eficacia y seguridad) ha evaluado a más de 115 pacientes con melanoma y sobre 25 con otras neoplasias, especialmente de próstata (Reyes, 2013). Los resultados clínicos han mostrado una clara mejoría en los pacientes con melanoma, mientras que en los otros casos los resultados se muestran claramente promisorios. Sin embargo, para lograr que la tecnología sea adoptada en otros países se requiere efectuar estudios clínicos de Fase III (estudios aleatorios con más de 200 pacientes bien definidos), que incluya a pacientes tratados con TAPCells, y compararlos con el tratamiento tradicional de quimioterapia con decarbazina. Este tipo de estudio debe realizarse por entidades certificadas en países como EE.UU., Australia o Europa bajo estrictos estándares regulatorios. El costo de estos ensayos clínicos está en el rango de 25 a 100 millones de dólares, dependiendo el costo final de varios elementos, entre los que se encuentra la prevalencia de la enfermedad en el país elegido.

Sin perjuicio de que inversionistas locales apoyen el emprendimiento de la Fase clínica II a nivel internacional, Oncobiomed ha desarrollado una estrategia que implica el financiamiento por parte de una subvención Corfo-Innova que permitiría implementar este plan en Australia, país con una alta incidencia de melanoma. De concretarse este plan se lograrían dos objetivos: por una parte, validar la terapia con TAPCells en la Fase III y, por otra, abrir el mercado australiano para la terapia desarrollada por Oncobiomed.

Literatura citada

- AGUILERA, R., SAFFIE, C., TITTARELLI, A., GONZÁLEZ, F. E., RAMÍREZ, M., REYES, D., PEREDA, C., HEVIA, D., GARCÍA, T., SALAZAR, L., FERREIRA, A., HERMOSO, M., MENDOZA-NARANJO, A., FERRADA, C., GARRIDO, P., LÓPEZ, M. N., SALAZAR-ONFRAY, F. Heat Shock Induction of Tumor-Derived Danger Signals Mediate Rapid Monocyte Differentiation to Clinically Effective Dendritic Cells. *Clin Cancer Res.* 17(8); 2474–2483, 2011.
- DOYLE, K., BEER, S., AND VORHIES, P. The Ongoing Hopes and Challenges of Cancer. *Oncology Business Review*. <http://www.oncbiz.com>, 2012.
- FIGDOR, C.G., M DE VRIES, I.J., LESTERHUIS, W.J. Dendritic cell immunotherapy: Mapping the way. *Nature Medicine*, Vol 10/5, 2004.

- GALLUZZI, L., SENOVILLA, L., VACCHELLI, E., EGGERMONT, A., FRIDMAN, W.H., GALON, J., SAUTÈS-FRIDMAN, C., TARTOUR, E., ZITVOGEL, L., KROEMER, G. Trial Watch: Dendritic cell-based interventions for cancer therapy. *Oncoimmunology*, 1:7, 1111-1134, 2012.
- IMS INSTITUTE FOR HEALTH CARE INFORMATICS (2012). The global Use of Medicines: Outlook Through 2016. Report by the IMS Institute for Healthcare Informatics.
- LONCHAY, C., VAN DER BRUGGEN, P., CONNEROTTE, T., HANAGIRI, T., COULIE, P., COLLAU, D., LUCAS, S., VAN PEL, A., THIELEMANS, K., VAN BAREN, N. AND BOON, T. Correlation between tumor regression and T cell responses in melanoma patients vaccinated with a MAGE antigen. *Proc Natl Acad Sci USA*;101 (Suppl 2):14631-14638, 2004.
- LÓPEZ, M.N., PEREDA, C., SEGAL, G., MUÑOZ, L., AGUILERA, R., GONZÁLEZ, F. E., ESCOBAR, A., GINESTA, A., REYES, D., GONZÁLEZ, R., MENDOZA-NARANJO, A., LARRONDO-NESTLE, F.O., ALIJAGIC, S., GILLIET, M., SUN, Y., GRABBE, S., DUMMER, R., BURG, G., SCHADENDORF, D. M., COMPÁN, A., FERRADA, C., SALAZAR-ONFRAY, F. Prolonged survival of dendritic cell-vaccinated melanoma patients correlates with tumor-specific delayed type IV hypersensitivity response and reduction of tumor growth factor β -expressing T cells. *J. Clin. Oncol.* 27:945-952, 2009.
- NESTLE, F.O., ALIJAGIC, S., GILLIET, M., SUN, Y., GRABBE, S., DUMMER, R., BURG, G., SCHADENDORF, D. Vaccination of melanoma patients with peptide- or tumor lysate-pulsed dendritic cells. *Nature Med* 4(3): 328-332. (1998).
- ORELLANA, C. Phase I melanoma trial puts Chile on the map. *The Lancet Oncology* 4(12); 712, 2003.
- SALAZAR, F. El sistema inmune, herramienta estratégica en la batalla contra el cáncer. *Revista Chilena de Pediatría* 71/4. 2000.
- SALAZAR-ONFRAY, F., NITSCHKE, M., RAMOS, C., INSUNZA, R., ALVAREZ, A. An ex vivo fast and efficient process to obtain activated antigen –presenting cells that are useful for therapies against cancer and immune system related diseases. *Solicitud de patente PCT/EP2008/062909*, 2008.
- SCHUMPETER, J.A. *The Theory of Economic Development: An Inquiry into Profits, Capital, Credit Interest and the Bussiness Cycle*. New Brunswick USA. Transaction Publishers. 1934.
- VALLEBUONA, C. & MORGADO, T. Vigilancia epidemiológica de cáncer. Taller de Epidemiología 2011, *Revista Ministerio de Salud, Chile*. 2011.

Figuras

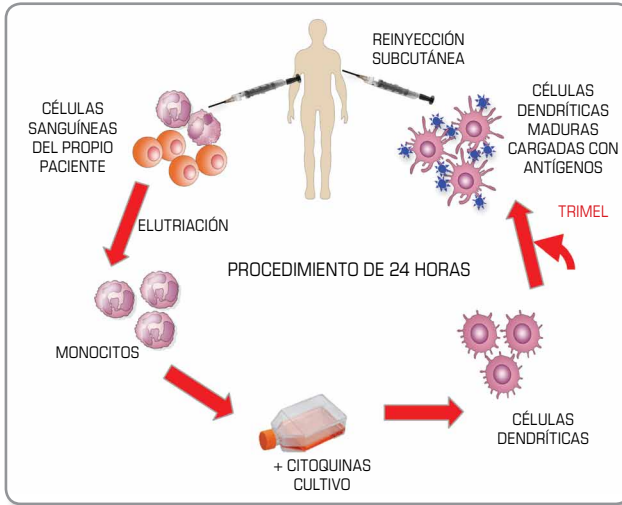


Figura 1. Esquema de la producción de TAPCells + Trimel y tratamiento del paciente. Procedimiento y tratamiento de paciente con melanoma. Al paciente se le extrae una muestra de sangre en una unidad de banco de sangre, donde se realiza un procedimiento llamado leucaféresis. La sangre es procesada en un laboratorio de alta seguridad biológica, transformada en células dendríticas y puesta en contacto con Trimel y finalmente convertida en TAPCells. Las TAPCells (20 millones por dosis) son inyectadas de manera subcutánea o intradérmica en el paciente. Las vacunaciones se realizan en cuatro dosis cada 20 días.

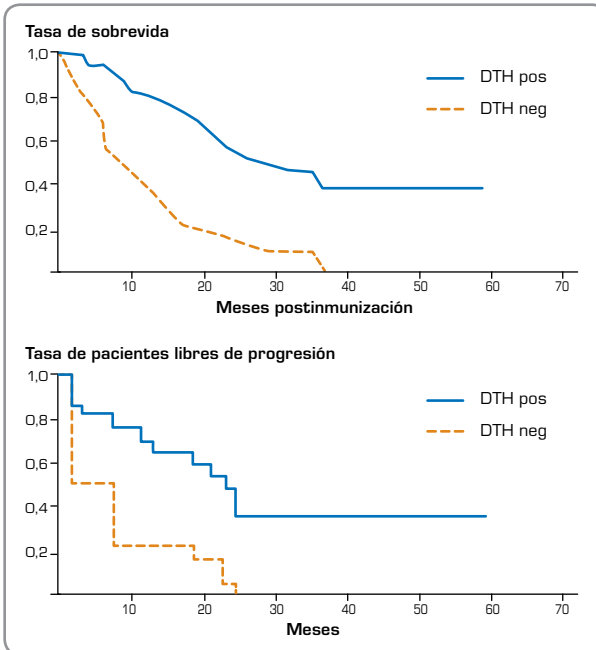


Figura 2. Supervivencia de los pacientes vacunados (A) y estabilidad de la enfermedad en estos pacientes (B). Las curvas representan a dos grupos de pacientes: en azul aquellos que mostraron una reacción de hipersensibilidad por células positiva (DTH pos), mientras que la línea naranja representa al grupo de pacientes cuya reacción de hipersensibilidad fue negativa (DTH neg).

En A se muestra la supervivencia de los pacientes vacunados. Los resultados deben compararse con la tasa histórica de supervivencia de los pacientes en etapa IV, cuyo valor es inferior a 10 meses. En B se grafica la estabilidad del tratamiento (pacientes libres de la enfermedad).

TABLA 1. Resumen de ensayos con vacunas de células dendríticas contra melanoma.

Investigador	Fuente del antígeno	CD	Madurado	Ruta	Nº Pacientes	Respuesta
Nestle <i>et al.</i>	Lisados, péptidos y KLH	Mono	No	LNs	16	2 RC, 3 RP
Chakraborty <i>et al.</i>	Lisados de melanoma	Mono	No	i.d.	15	1 RP
Ranieri <i>et al.</i>	gp100, MART-I, tirosinasa	Mono	No	i.v.	23	2 RC, 1 RP
Thurner <i>et al.</i>	MAGE-3A.1	Mono	Sí	s.c. + i.d. x3	13	6 RP o RM
Schuler-Thurner <i>et al.</i>	MAGE-3A.1	Mono	Sí	i.v. x3	24	1 RC
Gajewsky <i>et al.</i>	MAGE-3, MART-1	PBL	No	s.c. + IL-12 s.c.	15	1 RP 3 RM
Panelli <i>et al.</i>	MART-1, gp100	Mono	No	i.v.	17	1 RP
Jonuleit <i>et al.</i>	MART-1, MAGE-1	Mono	Sí	LNs	11	3 RP
Smithers <i>et al.</i>	Lisados	Mono	No	s.c.	22	1 RC 2 RP
Mackenson <i>et al.</i>	MART-1, gp100, tirosinasa	CD34	Sí	i.v.	14	1 RC 1 RP
Banchereau <i>et al.</i>	MART-1, gp100, MAGE-3, tirosinasa	CD34	Sí	s.c.	17	3 RC 3 RP
Chang <i>et al.</i>	Lisados de melanoma	Mono	No	i.d.	17	1 RP
Lau <i>et al.</i>	gp 100, tirosinasa	Mono	No	i.v.	16	1 RC, 2 RP

RC = respuesta completa
 RP = respuesta parcial
 Mono = derivado de monocitos
 PBL = derivados de células totales de sangre
 CD34 = derivados de precursores
 MAGE = antígeno asociado a melanoma
 MART = antígeno de melanoma reconocido por linfocitos T
 gp100 = glicoproteína 100
 LN = ganglio linfático
 i. d. = intradérmico
 i. v. = intravenoso
 s. c. = subcutáneo

Información técnica del proyecto

Desarrollo de inmunoterapia celular para el tratamiento del cáncer

Financiamiento	Fuentes	Conicyt (Fondef, Fondecyt, PBT) Corfo Innova
	Montos	USD 2,5 MM
Tiempo involucrado (desde la idea a la innovación)	10 años	
Patentes o registros de protección industrial (INDICAR QUÉ TIPO DE PROTECCIÓN SE REALIZÓ)	Solicitudes (n° de solicitudes)	Nacionales: N° 2825-2007,
		Internacionales: PCT/ EP2008/062909 USA, Australia, Japón, Canadá, Nueva Zelanda, Argentina, México, Brasil, India, Europa
	Concesiones (n° de Patentes)	Nacionales:
		Internacionales: Australia, Nueva Zelanda, México.
Investigadores/gestores	Flavio Salazar; Mercedes López, Carlos Ferrada, Cristián Pereda	
Industria que adoptó la innovación	ONCOBIOMED ADVANCED CELL TECHNOLOGY S. A.	
Inversión en la innovación	USD 15 MM Se buscarán inversionistas nacionales en una primera etapa y luego internacionales.	

ANÁLISIS DE LOS CASOS DE INNOVACIÓN DESCRITOS

Fernando Lund,
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Bernabé Santelices,
Facultad de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Introducción

Este capítulo busca sistematizar la información entregada por los autores de cada uno de los capítulos anteriores, identificar rasgos comunes a los casos descritos si los hay, así como sus características más sobresalientes: ¿Cómo nacieron? ¿Qué tipo de personas estuvieron involucradas? ¿Cuál era su formación y motivación? ¿En qué escala de tiempo se desarrollaron? ¿A quién beneficiaron? ¿Cuál fue el papel del entorno institucional? A partir de la respuesta a estas preguntas se extraen lecciones que se explicitan en el capítulo final, “Recomendaciones”.

A. Los casos de innovación

Sector acuícola (Buschmann)

La aparición del virus ISA en el sur de Chile afectó muy negativamente a la salmónica. Esto llevó al establecimiento, a través de la acción del Estado, de medidas regulatorias. Una de ellas fue la creación de “barrios de producción de salmonídeos”. Una vez que se implementó esta medida, surgieron otras limitaciones que no habían sido detectadas con anterioridad; una de ellas fue el desconocimiento del movimiento de las masas de agua en la región y, por lo tanto, entre sectores productivos. Así, hay una incertidumbre considerable acerca de la transferencia de patógenos entre centros de producción. Para resolver este problema, un grupo de investigadores de la Universidad de Los Lagos y de la Universidad de

Concepción desarrolló, en un lapso de entre 1 y 2 años, una herramienta de simulación numérica, oceanográfica-atmosférica, para la estimación de riesgos sanitarios derivados de la dispersión de partículas virales de ISA: El software utilizado correspondió a códigos abiertos y libres. Esto se hizo en el marco de una alianza universidad-empresa, Ocean Applied Science Ltd. (OASC), y el modelamiento ha sido validado por mediciones posteriores. El costo involucrado en el desarrollo fue \$50.000.000, aportados por la empresa Salmones Friosur Ltda. Otras empresas no se han interesado en adquirir el producto.

Sector agropecuario y alimentos (Peña)

La innovación consistió en un cambio en la costumbre de eliminar parte de los racimos de una viña, así como en las técnicas de riego, lo que redundó en un aumento de entre 30 y 40 % en el rendimiento de la hectárea de viñedo con uvas de la misma calidad para la elaboración de vinos. El trabajo se realizó sobre la base de un proyecto Fondecyt (2002-2005) por \$75.000.000, y un proyecto por \$100.000.000 enmarcado en un consorcio Innova-Corfo (2006-2010). El conocimiento, divulgado a través de publicaciones ISI, es de uso público y ha sido empleado por otras viñas para la elaboración de vinos finos. Esto funcionó, pues, si bien la práctica anterior era copiada de lo que se hace en Francia, en los valles cálidos de Chile llueve menos y hace más calor, y la investigación científica referida concluyó que las prácticas francesas no eran adecuadas para la realidad chilena. El Proyecto Innova-Corfo confirmó la validez de esta conclusión a escala precompetitiva.

Sector ciencia de los materiales (Quijada)

Este capítulo incluye dos ejemplos de innovación:

Ejemplo 1: Nanocompuestos poliméricos con arcillas. La novedad estuvo en la introducción de un compatibilizante (agente que une la matriz con el aditivo en el compuesto) a base de ácido itacónico. La idea se generó e implementó en los laboratorios del Centro para la Investigación Interdisciplinaria Avanzada en Materiales de la Universidad de Chile (CIMAT), y dio origen a numerosas publicaciones y tesis, y varias patentes, con financiamiento público. El escalamiento fue financiado en parte por la empresa brasileña BRASQUEM, la que la comercializa en la actualidad. La escala de tiempo fue de 5 años. No hay información disponible acerca de las ventas.

Ejemplo 2: Nuevos usos del cobre como agente bactericida. Como se ha sabido por milenios, el cobre tiene propiedades bactericidas. Sin embargo, solamente en 2007 la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos aprobó el registro de 270 aleaciones de cobre al validar

su propiedad bactericida para su uso en superficies sólidas de contacto. Se trata del único metal con esta certificación. Con la experiencia ganada con los nanocompósitos con arcillas, en el CIMAT se inició una actividad en compósitos poliméricos con nanopartículas de cobre. Se produjo una intensa interacción con la industria del cobre, debido a la colaboración del CIMAT con la International Copper Association (ICA). Esto llevó a una rápida evolución de una variedad de iniciativas destinadas a elaborar nuevos productos aprovechando la propiedad bactericida del cobre. Como parte de esta evolución, además de publicaciones y patentes, se crearon varias empresas (Copper Andino, DUAM, CopperBioHealth, Plasticopper) que comercializan los productos. El financiamiento ha venido de Corfo, Conicyt, y Codelco.

Sector energía (Palma)

La innovación descrita en este capítulo tiene un perfil tecnológico, por oposición a las mejoras de gestión o de optimización de procesos. Consiste en el desarrollo de un sistema de correa transportadora de material para Minera Los Pelambres, con la capacidad de regenerar energía eléctrica. Se trata de una colaboración entre esta empresa y la Universidad Técnica Federico Santa María. El origen de la idea data de 1984. Su implementación se llevó a cabo a mediados de los 90 y su puesta en marcha el 2000. El financiamiento, privado, fue otorgado por Antofagasta Minerals (AMSA) y la generación de conocimiento necesaria fue financiada por Conicyt. Se originaron publicaciones y tesis.

Sector forestal (Bown)

La innovación consiste en la creación de una herramienta computacional, el Modelo Nacional de Simulación de Crecimiento (MNSC). Esta innovación permite predecir los crecimientos y rendimientos de plantaciones forestales. Esto lo hizo un consorcio de empresas forestales, universidades e institutos de investigación en un período de más de veinte años, y es ampliamente utilizado por la industria. El modelo nació como una iniciativa privada que ha invertido del orden de 20 millones de dólares, más alrededor de 1 millón de dólares de fondos públicos. Se proyecta su exportación. La base científica consiste en el encapsulamiento del crecimiento de plantaciones forestales para distintas zonas de crecimiento y regímenes de manejo de manera coherente mediante un conjunto de reglas y ecuaciones matemáticas que interactúan entre sí. El nacimiento del modelo se dio por la necesidad de la industria y, al alero de la Fundación Chile, las principales empresas forestales se pusieron de acuerdo, en 1989, para financiar y desarrollar un único modelo como alternativa preferible a la adquisición de paquetes en el extranjero, opción cara e

incierto. El asunto ha evolucionado positivamente y en 2006 el proyecto se trasladó a la Universidad de Concepción.

Sector ingeniería estructural (Sarrazin)

La innovación consiste en introducir aisladores sísmicos en la construcción chilena. El origen de la idea está en Nueva Zelanda y EE.UU. en los años 1960-1970. El primer edificio aislado en Chile (Comunidad Andaluza) se construyó en 1992 y fue el fruto de una colaboración entre la Universidad de Chile, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo y dos empresas. El primer puente aislado en Chile (Marga-Marga en Viña del Mar) se construyó en 1996. Con posterioridad se han construido, o están en etapa de proyecto, más de 20 edificios de alturas de hasta 28 pisos y cerca de 10 puentes o viaductos con aisladores de goma natural de alto amortiguamiento o deslizantes. A esto hay que agregar observatorios, hospitales y otras construcciones especiales. Los que estaban ya construidos soportaron en forma excelente el Terremoto del Maule del 27 de Febrero de 2010. El conocimiento necesario para dar sustento a estos desarrollos se generó con el financiamiento de Conicyt, Corfo y el MOP.

Sector informática (Baeza)

Este capítulo incluye dos ejemplos desarrollados por el laboratorio de Yahoo! Labs en Chile. Desarrollar este tipo de instrumentos constituye parte de la misión del laboratorio.

Ejemplo 1: Optimización de motores de búsqueda vertical para Yahoo! Una de las contribuciones del laboratorio en Chile ha sido mostrar que con algoritmos eficientes de procesamiento de consultas es posible reducir la cantidad de recursos de hardware requeridos para atender una determinada carga de trabajo. Por lo tanto, al disminuir la redundancia de recursos, es posible reducir la cantidad de energía consumida.

Ejemplo 2: Observatorios de la Web en tiempo real. Consiste en la recolección e indexación en el espacio y tiempo de objetos en tiempo real y en aplicar sobre estos objetos un conjunto de operadores espacio-temporales. Esto permite observar tendencias en la Web y en las redes sociales en tiempo real. Financiado por Fondef.

Sector medio ambiente (Bozinovic)

La innovación consiste en el control de enfermedades en pino usando un hongo. Si bien la existencia del hongo en cuestión se conoce desde hace 200 años, y su estructura y función desde hace 100, investigaciones recientes (2000), iniciadas con el financiamiento del FIA, permitieron delimitar la especificidad de la acción del hongo, sugiriendo su aplicación para la agri-

cultura y la gestión ambiental. Tres exalumnos de la Universidad de Talca fundaron un *spin-off*, BioInsmos Nativa Ltda., para comercializar el producto. Dos hitos en la evolución del asunto fueron la estandarización del prototipo inicial para una producción en escala y la preparación de personal para la producción y ventas. Entre el establecimiento de la empresa y la llegada al mercado pasaron 5 años. El éxito alcanzado llevó al desarrollo de dos nuevos productos, un bactericida y un insecticida, ambos biológicos. La empresa genera, ella misma, información científica.

Sector minería (Conca)

La innovación descrita es un nuevo proceso de fundición para la Mina El Teniente, conocido como “Convertidor Teniente”. El esfuerzo se inició a principios de los 70 y la nueva metodología se puso en operación entre 1975 y 1977, aumentando la producción en más de 50 %. Esto se llevó a cabo al interior de la empresa y dio lugar a una patente. La tecnología se exportó a otras minas nacionales, así como al Perú, México, Zambia y Tailandia. Para esto fue necesario sistematizar el conocimiento generado, así como capacitar a mandos medios y trabajadores de fundiciones. Con el correr del tiempo, el proceso fue mejorado, sobre la base de la creación de conocimiento, gradualmente. Destaca la asociación de Codelco con el IM2 (Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia) y el CMM (Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile) para aumentar la capacidad de fusión desde 2.200 ton/día hasta 3.000 ton/día, lo que se llevó a cabo entre 2000 y 2003. Estas últimas innovaciones dieron lugar a patentes, publicaciones y tesis.

Sector nanotecnología (Kiwi)

La innovación se enmarca en el ámbito de la industria de los envases y embalajes para los alimentos de exportación, y consiste en la obtención de un *film* que incorpora agentes antimicrobianos de origen natural (Timol) en una estructura polimérica, de modo de incrementar la vida útil del salmón fresco refrigerado, lo que se logró en un 20 %. La innovación propiamente tal está en el proceso, que permite la incorporación del agente antimicrobiano solamente a la capa del *film* que está en contacto directo con el alimento, mientras que las demás capas aportan los otros requerimientos de estructura del *film*. Ella fue financiada por Fondef, y su comercialización está en estudio.

Sector pesquero (Castilla)

El manuscrito incluye dos ejemplos de innovación:

Ejemplo 1: Innovación legislativa (no patentada) Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB), traducida en la Ley nº

18892 (1991). Durante los 80 se sobreexplotó el loco (*Concholepas concholepas*), lo que condujo a su veda entre 1989 y 1993, causando un problema social agudo a las comunidades asociadas a los más de 10.000 buzos dedicados a su extracción. Por otro lado, también durante la década de los 80, científicos de la Universidad Austral y de la P. Universidad Católica de Chile realizaron estudios del rol ecológico del loco en las comunidades intermareales y submareales, con el financiamiento de Conicyt, Corfo, y el International Development Research Center (IDRC) de Canadá. Esto llevó a sugerencias de manejo cuyo escalamiento fue financiado por Conicyt, que luego se establecieron en la ley indicada. Esto ha dado sustentabilidad a una industria de pesca artesanal que involucra a entre 20.000-25.000 pescadores. Se trata de una innovación no patentable en torno a un bien público que ha tenido beneficios adicionales a los puramente económicos, por ejemplo la cohesión y empoderamiento de las comunidades involucradas. Las AMERBs se han imitado en Perú y Uruguay. El beneficio, sin embargo, no dura para siempre: recientemente el loco chileno está sujeto a la competencia creciente del loco peruano y del abalón no cultivado. Una conclusión interesante emanada de este estudio es que la sustentabilidad en el largo plazo puede llevar a una disminución en los retornos en el corto plazo.

Ejemplo 2: Nuevos instrumentos (no patentados) para la pesca del bacalao de profundidad. El problema era la mortalidad incidental de especies distintas al bacalao durante su pesca. Primero, este pudo ser cuantificado solamente después de incorporar observadores científicos en los buques. El estudio inicial, de la U Austral, fue financiado por el Fondo de Investigación Pesquera (FIP). Se identificó la causa del problema y se solucionó rediseñando los “palangres” (líneas de anzuelos). Su beneficio se estima en 7,5 MUSD anuales, para una industria que exporta 30 MUSD por año. La innovación también es usada por las flotas de Uruguay, Argentina y Malvinas.

Sector salud (Rosemblatt)

La innovación es una inmunoterapia celular hecha en Chile (TAPCells®). La idea de que el sistema inmune puede utilizarse para eliminar tumores se remonta a casi un siglo. Ella ha generado un enorme volumen de investigación básica y clínica durante décadas en todo el mundo. El grupo del Dr. Salazar ha diseñado células llamadas TumorAntigen-Presenting-Cells (TAPCells) a partir de las células de una persona, que, reinyectadas, aumentan la sobrevida en pacientes con melanoma maligno (MM; cáncer a la piel). A la fecha, los autores han documentado tratamiento a 250 pacientes con MM grado IV, obteniéndose respuesta inmunológica a la inyección con TAPcells en el 60 por ciento de los casos y un incremento en la mediana de sobrevida a 33 meses en el grupo en el que se obtuvo respuesta inmune. Este desarrollo, que se sustenta en numerosas publi-

caciones científicas y algunas patentes, se ha logrado por investigadores universitarios en el marco de una empresa, ONCOBIOMED, cuyo financiamiento inicial vino de Fondef y de Corfo.

B. Patrones y factores de desarrollo de las innovaciones

¿Cómo se originaron estas innovaciones?

Si bien los ejemplos mencionados tuvieron una variedad de orígenes, es posible distinguir tres grupos: Aquellos en que el origen estuvo en la curiosidad o interés de investigadores universitarios (Castilla, Quijada, Rosemblatt, Sarrazin), aquellos que nacieron por una necesidad imperiosa de la industria (Buschmann, Conca) y los que evolucionaron a partir de una relación entre investigadores universitarios y empresas (Bown, Bozinovic, Kiwi, Palma, Peña).

En el primer grupo, los investigadores asociados al Dr. Castilla iniciaron el estudio de la ecología de dos sistemas costeros intermareales sin otra motivación aparente que la curiosidad de saber más acerca de esos sistemas. El conocimiento generado sirvió de sustento para investigaciones focalizadas posteriores que llevaron a las innovaciones relacionadas. Los investigadores asociados al Dr. Sarrazín iniciaron su trabajo con la intención de aplicar en Chile, un país sísmico, técnicas originarias de California y Japón, lo que lograron con éxito. Los casos relatados por los Drs. Rosemblatt y Quijada tienen en común que caen dentro de temáticas, salud y materiales, respectivamente, en que la actividad de innovación es altísima a nivel mundial pero prácticamente inexistente en Chile. En ambos casos el motor parece haber estado en personas de un espíritu particularmente emprendedor que no se sintieron limitadas por el hecho de vivir y trabajar en Chile. Las investigaciones en torno al cáncer mueven recursos enormes a nivel mundial. ¿Por qué eso se va a transformar en un impedimento para lograr avances significativos desde Chile? Del mismo modo, la industria del plástico involucra recursos muy cuantiosos a nivel mundial. ¿Por qué eso se va a constituir en un impedimento para lograr avances significativos desde Chile?

En el segundo grupo hay dos ejemplos, uno relacionado con la minería y el otro con la salmonicultura. En el caso de la minería, relatado por el Dr. Conca, fue la propia industria, en este caso la Mina El Teniente, la que se impuso una meta de aumentar significativamente la producción y se encontró con un cuello de botella en el proceso de fundición. Fueron los profesionales de la misma industria los que resolvieron el problema diseñando un nuevo proceso, así como el equipamiento asociado. Esto fue posteriormente mejorado sustancialmente en colaboración con investigadores universitarios. En el caso relatado por el Dr. Buschmann,

la salmonicultura chilena fue muy fuertemente afectada por la aparición del virus ISA a fines de la década del 2000. Esto motivó a una de las empresas afectadas a acercarse a los investigadores universitarios en busca de soluciones.

El tercer grupo de innovaciones parece haber surgido como consecuencia de una búsqueda sistemática de soluciones a través de asociaciones entre empresas e investigadores universitarios. En el caso relatado por el Dr. Bown, un consorcio de empresas, universidades e institutos de investigación desarrolló, en un lapso de 20 años y con financiamiento mayoritariamente privado, una herramienta computacional que permite predecir los crecimientos y rendimientos de plantaciones forestales. Fueron las principales empresas forestales las que se pusieron de acuerdo para financiar y desarrollar un único modelo, como alternativa preferible a la adquisición de paquetes en el extranjero. En el caso relatado por el Dr. Palma, una empresa minera, en asociación con una universidad, desarrolló un sistema de correa transportadora con la capacidad de regenerar energía eléctrica, lo que fue financiado mayormente por la empresa. En el caso de la industria del vino, relatado por el Dr. Peña, un consorcio de empresas y universidades cambió las prácticas traídas de Francia por otras mejor adaptadas al clima local, logrando un aumento de 30-40 % en el rendimiento de la hectárea de viñedo con uvas de la misma calidad para la elaboración de vinos. El caso del Dr. Buschmann es el de una empresa formada por investigadores universitarios, y el del Dr. Kiwi es una asociación entre investigadores universitarios y una empresa de la industria del embalaje.

¿De qué tipo de innovación se trata?

Entre las innovaciones consideradas están aquellas que adaptan técnicas foráneas a las condiciones locales, como en el caso de la industria forestal y la del vino. También, las que resuelven problemas únicos de la realidad chilena, como es el caso de la minería y la respuesta de las construcciones a los terremotos. También, aquellas que surgen de la necesidad imperiosa de salvar un negocio, como en el cultivo del salmón y la extracción del loco. Y están las que, tal vez, tienen la dosis mayor de emprendimiento y que podrían haberse dado en cualquier parte del mundo, como el caso de los nuevos tratamientos contra el cáncer y los nuevos materiales para la industria del plástico.

¿Cui bono?

Asociado a una innovación exitosa, hay un beneficio. ¿Cuál es la naturaleza de este beneficio, y quién lo aprovecha? En general, el mayor valor va en beneficio de la(s) empresa(s) que han cofinanciado el desarrollo.

Las universidades se benefician a través de oportunidades de formación para sus estudiantes, a través de temas de memoria o tesis, o bien de posibilidades de ampliación de las mallas curriculares. También, sus académicos se benefician de la exposición a desafíos intelectuales interesantes. Adicionalmente, hay desarrollos que no son apropiables y que benefician a la comunidad como un todo, de una manera difícil de cuantificar con precisión. Es el caso de la extracción del loco y de la ingeniería sísmica. Finalmente, hay conocimiento cuyo impacto sí es cuantificable, pero que ha sido definido de uso público desde su inicio, aun cuando algunas empresas hayan intervenido en su financiamiento. Es el caso de las nuevas técnicas introducidas en la elaboración de vinos finos.

El conocimiento que se generó en torno a la ecología de zonas intermareales dio lugar a numerosas publicaciones y tesis. Sin embargo, no se tradujo en patentes ni en productos de valor comercial reconocible. Sí se tradujo en leyes que regulan la extracción del loco y que le dan sustentabilidad al recurso y aseguran así una fuente de trabajo directo a 20.000-25.000 pescadores. Adicionalmente, las comunidades involucradas se han cohesionado y empoderado, lo que es una mejora en la calidad de vida difícil de cuantificar. Finalmente, los instrumentos utilizados han sido exportados a Perú y Uruguay.

En el caso de la ingeniería sísmica, el conocimiento generado, que dio lugar a publicaciones y tesis, tampoco fue susceptible de patentamiento. Sí se generó una normativa para el diseño de edificios con aislación sísmica. También ha sido posible comparar el comportamiento de edificios similares con aislación ante sismos y sin ella, como el de 27 de febrero de 2010, y la respuesta de aquellos con aislación es considerablemente más satisfactoria. Los edificios, construidos o en proyecto, con aislación sísmica en la actualidad representan una inversión del orden de USD 15 millones. Nuevamente, sin embargo, resulta difícil cuantificar el cambio en la calidad de vida de sus habitantes.

El conocimiento generado en torno al Convertidor Teniente, al sistema de correa transportadora en Minera Los Pelambres, al modelamiento de la dispersión de patógenos entre diferentes sitios de producción de salmones, y al Modelo Nacional de Simulación de Crecimiento de la industria forestal puede ser, y ha sido, apropiado. La apropiación ha sido por parte de las empresas, que han actuado individualmente o en forma de consorcio, y que fueron las principales financistas de los proyectos. En algunos casos se ha protegido a través de patentes y en otros no.

Los nuevos tratamientos de cáncer, los nuevos materiales nanocompuestos y el control de las enfermedades del pino usando hongos han dado lugar a empresas formadas por los propios investigadores creadores del conocimiento, o con su participación cercana, para su explotación comercial. Estos emprendimientos han comenzado solo en años recientes, por lo que será interesante ver cómo evolucionan estas empresas. Da la impresión de que se trata de un camino atractivo para personas jóve-

nes, talentosas, y con espíritu de aventura y que puede tener un efecto multiplicador importante.

En todo caso, la apropiación de resultados obtenidos total o parcialmente en laboratorios de universidades y por el personal contratado por ellas a jornada completa, plantea asuntos delicados de conflicto de interés y de propiedad intelectual que deben aclararse al principio de un emprendimiento, pues de otro modo pueden llevar a conflictos que, incluso, paralicen un proyecto. Estos asuntos no son una novedad en el mundo, pero tampoco lo es el difícil camino que es necesario seguir para su solución cuando se presenta una dificultad.

Las personas

De los casos analizados es posible concluir que la innovación la hacen personas con ciertas características. Ellas son competentes, bien formadas, motivadas, tenaces, con curiosidad y con espíritu de aventura. No hay ley, instrumento o incentivo en el mundo que pueda generar innovaciones si no hay personas disponibles con preparación adecuada. Más específicamente, es posible identificar algunos aspectos comunes importantes: a) Una formación básica sólida y amplia que permite comprender y estar al día de lo que ocurre tanto dentro como fuera del país, así como un diálogo real (i.e., de dar y recibir) con los principales actores involucrados. b) Una costumbre de tratar de empujar las fronteras de lo posible. c) Si bien la especialización es importante para la formación rigurosa, para poder pensar fuera de los límites convencionales también es importante la costumbre de dialogar entre las disciplinas. d) La innovación se realiza con la participación de muchas personas, cuya educación es avanzada, sofisticada y con conocimiento de las realidades globales. Puede que una innovación específica se asocie a un nombre en particular. Pero, invariablemente, tal persona interactúa con un entorno inmediato y con una amplia comunidad nacional e internacional.

El papel del estado es esencial

Si bien en el ejemplo relatado por el Dr. Buschmann parece haberse producido un acercamiento entre una empresa y una universidad sin intermediación pública, el resto de las innovaciones descritas se apoyaron en instrumentos diseñados en agencias del gobierno, como Conicyt, Corfo y diversos ministerios, o bien en empresas estatales como Codelco. Esto salta a la vista ya en una primera lectura, y parece haber sido un aspecto esencial, de los casos descritos por los Dres. Baeza, Bozinovic, Castilla, Conca, Kiwi, Peña, Quijada, Rosemblatt y Sarrazin. En los casos descritos por los Dres. Bown y Palma, si bien los instrumentos públicos fueron empleados, no parecen haber sido el motor principal.

Conicyt, la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica, dependiente del Ministerio de Educación, administra diversos programas. Entre ellos Fondecyt, el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico, que financia proyectos de 1 a 4 años de duración, al nivel de los 10-50 millones de pesos por año, individuales o de grupos pequeños, en que el principal requisito es la calidad y originalidad del conocimiento generado, medido por parámetros de alcance global. Existe desde principios de los años 80. Otro instrumento es Fondap, el Fondo de Desarrollo de Áreas Prioritarias, que financia proyectos interdisciplinarios formulados por grupos de investigadores para períodos de 5-10 años, al nivel de los 800 millones de pesos por año, en áreas del conocimiento predeterminadas. Existe desde 1998. Conicyt también financia a investigadores posdoctorales (hasta tres años después que han obtenido su grado de doctor), así como, en forma de becas, a estudiantes de máster y doctorado. Estos programas están principalmente orientados al mundo académico, y no requieren de una interacción con el mundo de la producción. Distinto es el caso de Fondef, el Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico, que requiere de la coparticipación de instituciones de investigación y empresas. Este instrumento existe desde 1991 y en la actualidad cofinancia proyectos al nivel de los 100 millones de pesos por períodos de 2 años.

La Corfo, Corporación de Fomento de la Producción, depende del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, existe desde 1939. Su Gerencia de Innovación (InnovaChile), que promueve acciones en materia de innovación, emprendimiento innovador y transferencia tecnológica, en la actualidad administra una gran variedad de programas. Para saber más acerca de ellos, es necesario ingresar a su página web.

La FIA, Fundación para la Innovación Agraria del Ministerio de Agricultura, administra distintos instrumentos de cofinanciamiento para promover y fomentar la innovación en el sector agroalimentario y forestal. Y el FIP, Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura, depende de la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo que existe desde 1991, está destinado a financiar estudios necesarios para fundamentar la adopción de medidas de administración de las pesquerías y de las actividades de acuicultura. Estas medidas de administración tienen por objetivo la conservación de los recursos hidrobiológicos, considerando tanto aspectos biológicos como pesqueros, económicos y sociales.

El Estado también puede ser un freno a la innovación. Por ejemplo, en el relato del Dr. Buschmann se observa, como un obstáculo, que no parece haber claridad acerca de los mandatos y competencias de la SUBPESCA (Subsecretaría de Pesca y Acuicultura del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo) y el IFOP (Instituto de Fomento Pesquero). También da la impresión de que estas instituciones carecen de la agilidad y capacidades para enfrentar situaciones imprevistas y rápidamente cambiantes.

Otra manera en que el Estado puede frenar la innovación es a través de la estructura jurídica de las universidades estatales, en cuyo marco se desempeña un número considerable de innovadores, actuales o en potencia. El relato del Dr. Quijada menciona tal situación como una desventaja competitiva frente a la situación de universidades de estructura jurídica privada.

Finalmente, un aspecto esencial de la acción del Estado, mencionada por el Dr. Bown, es asegurar la estabilidad política y económica de la nación, sin la cual es imposible planificar acciones en la escala de 5-25 años como las que se estudian en este volumen.

Las universidades

Del análisis de los ejemplos proporcionados es posible concluir que ninguno habría ocurrido sin universidades que generen conocimiento de manera profesional y autónoma por dos simples razones: En ellas se entrega la formación básica a las personas que luego generarán innovación, y en ellas se desempeñan los investigadores cuya profesión es empujar la frontera del conocimiento, y que tienen las redes interdisciplinarias e internacionales necesarias para conocer el estado del arte en algún tema.

De las innovaciones analizadas, algunas se han dado en el marco de una colaboración formal entre una o varias empresas y una o varias universidades. Es el caso del modelamiento de la dispersión de patógenos entre diferentes zonas de cultivo de salmones, los nuevos manejos de la vid para la obtención de vinos de alta calidad, el modelo nacional de simulación de crecimiento forestal, los nuevos embalajes para la exportación del salmón, el nuevo diseño de correa transportadora que puede regenerar energía eléctrica y las nuevas tecnologías de búsqueda y minería de datos en la web.

Otros casos han involucrado a nuevas empresas generadas a partir de iniciativas de investigadores universitarios: es el caso del uso de microorganismos para el control de plagas, los nuevos materiales que explotan la propiedad bactericida del cobre, o el desarrollo de una nueva vacuna contra el cáncer.

Las innovaciones que se han traducido en nuevas normativas, como para la extracción del loco y para el diseño sísmico de edificios, y no en productos comerciales, han sido llevadas a cabo sustancialmente al interior de las universidades, si bien diferentes empresas pueden haber contribuido ocasionalmente con servicios valorados.

Finalmente, en el caso de un nuevo horno para la pirometalurgia del cobre, que fue realizado, en su primera etapa, al interior de una empresa, el papel de la universidad fue proporcionar profesionales competentes, capaces de enfrentar desafíos de calibre mundial. Las etapas posteriores fueron llevadas a cabo en alianza universidad-empresa.

Las empresas

Como se mencionó en el párrafo anterior, el diseño y fabricación del Convertidor Teniente fue, inicialmente, llevado a cabo en su integridad al interior de una empresa, la Mina el Teniente, poco después de su nacionalización, y respondió a la necesidad imperiosa de aumentar la producción. Dentro de los casos estudiados, este parece ser el único con estas características. En otro grupo de innovaciones, las empresas han participado activamente, en alianza con otros actores, en la búsqueda de soluciones innovadoras a problemas, ya sea de una planta específica, o de un rubro completo de la industria, participando en todas las etapas.

En varios casos fueron los investigadores los que, con el apoyo de instrumentos públicos, buscaron y encontraron interlocutores al interior de la empresa, lograron interesarlos y comprometerlos con emprendimientos de interés común. Finalmente, están las empresas formadas expresamente por investigadores en alianza con inversionistas y emprendedores.

En cualquier caso, una condición esencial para el éxito de una alianza universidad-empresa es la existencia de una atmósfera estable de colaboración y confianza mutuas.

¿Cuánto demora una innovación?

El tiempo que va desde la concepción de una idea hasta que produce efectos tangibles es muy variable. Desde luego, es difícil establecer con precisión la fecha de nacimiento de una idea. También es difícil determinar con precisión el momento de su fructificación. Sin embargo, es posible señalar algunos parámetros de interés. En primer lugar, para innovar en aquellos temas que involucran fenómenos de la naturaleza, como el crecimiento de los bosques, la respuesta de los edificios a los grandes terremotos, el cultivo de una especie animal o vegetal, el tiempo mínimo para verificar que una idea funciona, está dado por el ciclo natural del fenómeno. Un bosque tarda entre 10 y 25 años en desarrollarse. Los grandes terremotos en Chile ocurren cada 10 años, aproximadamente, pero en lugares distintos de nuestra geografía.

En el caso en que la innovación involucra a un nuevo producto tecnológico o a un proceso industrial que no está esencialmente ligado a un fenómeno de la naturaleza, la escala de tiempo que va desde la experimentación impulsada por la curiosidad, a la experimentación focalizada en una posible aplicación, al escalamiento industrial y a la manufactura comercial, parece ser no menor a los cinco años para las iniciativas exitosas. Es importante recordar que, por cada iniciativa exitosa, hay muchos intentos fallidos. No es posible, desde luego, predecir cuáles ideas van a llevar a un producto comercial con éxito de ventas y cuáles no. De hecho, la mayoría de las ideas no funcionan y no existen individuos o grupos

que solamente tengan ideas ganadoras. Por lo tanto, es importante para un grupo creativo tener estabilidad financiera e institucional para adquirir una costumbre de trabajar en equipo y generar credibilidad con la industria. Parece ser que 10 años es el mínimo de tiempo para que esto ocurra.

En el caso de innovaciones que resuelven problemas específicos de la industria, podría pensarse en tiempos más breves. Esto sería posible en un ambiente en que ya hay una cultura de colaboración estrecha entre las universidades y las empresas. En Chile esto todavía no ocurre, y parte importante del tiempo se va en adquirir confianzas mutuas. Este obstáculo se obvió en uno de los casos estudiados, el de los pasos iniciales que dieron paso al Convertidor Teniente, pues se trató de una innovación generada al interior de la compañía.

¿Cómo se mide el éxito de una innovación?

La Academia de Ciencias pidió a los autores de los distintos capítulos de este volumen que se refirieran a casos de innovación, entendida como un instrumento de creación de riqueza, basada en la creación de conocimiento en Chile. En la comunidad científica no hay muchas dudas a la hora de reconocer qué es nuevo conocimiento. Sin embargo, reconocer la creación de riqueza parece tener dificultades únicas. A primera vista, parece simple: basta con identificar un producto comercialmente exitoso. O, para evaluar un nuevo proceso, comparar la situación con la novedad y sin ella. Sin embargo, las situaciones reales pueden ser complejas. Por ejemplo, la racionalización del manejo de recursos bentónicos significó una disminución de los retornos de la industria comparada con la situación de sobreexplotación anterior, pero permitió la sustentabilidad de esa industria, y tuvo beneficios adicionales, de difícil cuantificación, para las comunidades involucradas. Desde luego, retornos bajo regulación parecen preferibles a cero retorno debido a una veda absoluta.

Otro obstáculo en el camino de la cuantificación de los beneficios de una innovación está en que, para ello, es necesario acceder a información, por ejemplo de ventas, que una empresa difícilmente desea compartir.

INNOVACIÓN CON BASE CIENTÍFICA: OBSERVACIONES PARA EL ANÁLISIS Y LA FORMULACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS

Bernabé Santelices,
Facultad de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Fernando Lund,
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Introducción

El análisis de los distintos casos de innovación descritos en este libro permiten sugerir observaciones para el análisis y la formulación de políticas públicas sobre I+D+i en Chile. Los seis temas más relevantes aquí considerados son:

1. Investigación científica como base de innovación;
2. Funciones y abundancia de investigadores en Chile;
3. Instrumentos de financiamiento para investigación e innovación;
4. Incentivos y gestión de la innovación en las universidades chilenas;
5. Los conceptos de I+D+i en los procesos de formación de estudiantes;
6. Apropiación y uso de resultados; el sector productivo.

1. Investigación científica como base de innovación

La totalidad de casos de innovación aquí descritos se iniciaron como estudios de investigación científica básica, que luego derivaron en trabajo tecnológico e innovaciones. Esta realidad es consistente con la importancia que los países con mayor desarrollo económico le confieren a la

investigación científica. Sin una ciencia básica fuerte y productiva, la mayor parte de la cual se realiza, en el Chile de hoy, en unas pocas universidades, no habría posibilidad de innovaciones con base científica. Y son estas últimas las que, a la postre, generan la mayor cantidad de riqueza a la sociedad, en las diversas acepciones de la palabra riqueza. De estos ejemplos resulta evidente que no hay desarrollo sin investigación científica e innovación.

Desde el punto de vista de las funciones tradicionales asignadas a la investigación científica en nuestra sociedad, este conjunto de casos de innovación le confiere otra dimensión a esas funciones. Resulta evidente que si se desea incrementar el desarrollo del país a través de innovaciones productivas, los recursos de todo tipo (humanos de formación avanzada, de infraestructura y equipamiento, económicos y financieros) deben aumentar muy significativamente en los próximos años. Es posible que sea necesario definir en forma explícita algunas áreas de mayor aplicabilidad en las que el país tenga ventajas comparativas para I+D+i. Sin embargo, los numerosos ejemplos de innovaciones tecnológicas que se iniciaron en investigaciones de ciencia básica indican que este último ámbito tampoco se puede descuidar. Así, la palabra clave parece ser flexibilidad. Cualquier priorización debiera tener puertas de escape para discontinuar aquellas iniciativas cuya evolución no satisface las expectativas iniciales, así como incluir mecanismos de entrada para las nuevas posibilidades que surgen de un entorno cambiante. Y, en cualquier caso, es indispensable dejar suficiente espacio para la creatividad de personas e instituciones que piensan fuera de los contornos establecidos.

2. Funciones y abundancia de investigadores en Chile

Como se indica en el capítulo anterior, parte importante de la responsabilidad del desarrollo de las innovaciones recae en los investigadores que lideran en el trabajo de investigación y en aquellos que también colaboran en los numerosos ámbitos que posteriormente inciden en su consolidación. Se reconoce que, además de una formación básica sólida y amplia, estos investigadores deben contar con mucha iniciativa, curiosidad intelectual, espíritu de aventura, y capacidad para incursionar en investigación multidisciplinaria, la que con frecuencia es necesaria para concretar las innovaciones. Del mismo modo, se reconoce la necesidad de una comunidad científica, en el sentido de un conjunto de individuos que no solo hacen bien su trabajo individualmente, sino que también interactúan entre sí, están conscientes de las capacidades de los demás y ocasionalmente actúan en conjunto de manera coherente. El trabajo en conjunto a menudo es más fecundo que un agregado de contribuciones individuales.

Dada la importancia de estas funciones, es preocupante constatar el bajo número de científicos activos en Chile que pudiesen jugar estos ro-

les en el desarrollo nacional. De acuerdo a estadísticas internacionales, entre los años 2007 y 2010 trabajaban en Chile entre 9.000 y 10.000 investigadores. Cuando estos valores se consideran en términos de jornadas de trabajo equivalentes a jornada completa, no sobrepasan las 6.000 personas. El 70-72% de estos investigadores activos trabajaba en universidades. En consecuencia, una fracción importante de su respectiva jornada de trabajo la dedicaban también a otras actividades, tales como enseñanza, orientación de estudiantes y gestión o administración universitaria. Más aún, solo entre el 57 y 58% de estos investigadores cuenta con formación doctoral. En términos de comparaciones, Chile cuenta con alrededor de 550 investigadores por millón de habitantes, un valor notoriamente menor que el de países con mayor desarrollo (por ejemplo 4.010 en Alemania, 7.725 en Finlandia, 5.125 en Japón o 4.700 en USA) e incluso menor que el de países de desarrollo intermedio (por ejemplo 1.077 en China, 2.949 en España, 3.650 en Portugal, 1.328 en Argentina). Incluso, el número de científicos y tecnólogos en Chile es menor que el equivalente al de países con menores ingresos (por ejemplo, Argentina, PIB per capita 2010: USD 9.227; Chile, PIB 2010: USD 11.896). Resulta evidente, en consecuencia, que el capital humano disponible en Chile se anticipa como muy limitante para un desarrollo futuro del país basado en innovación. Por lo tanto Chile debiera formular y ejecutar a mediano y más largo plazo un programa de formación, inserción y retención de investigadores para el desarrollo del país a través de innovación científico-tecnológica. El programa debiera aspirar a alcanzar en un plazo mediano (5-8 años) densidades de investigadores *per capita* equivalentes al de países con desarrollo intermedio, alcanzando los niveles de países iberoamericanos con mayor desarrollo (por ejemplo, España, PIB *per capita* 2010: USD 29.669) en un plazo de 12 a 15 años.

El problema de inserción de nuevos investigadores se encuentra estrechamente relacionado con disponibilidad de capital humano. La inserción de nuevo personal científico que está ocurriendo tanto en instituciones académicas como productivas es muy pequeña y la velocidad de incremento de dicho personal es notablemente baja. Más aún, en los próximos años, Chile estará recibiendo varios miles de investigadores que fueron enviados a doctorarse al extranjero, contingente que se estará sumando a los 400-450 doctores que el país gradúa anualmente. Sin una adecuada política de inserción de nuevos investigadores en el país, años de esfuerzos sociales e individuales no estarán siendo aprovechados para ayudar a resolver las limitaciones al desarrollo impuestas por el bajo número de científicos disponibles en Chile, tanto para investigación científica como para innovación. La Academia Chilena de Ciencias¹ ha analizado el problema y ha propuesto conjuntos sinérgicos de ac-

1 Academia Chilena de Ciencias, 2013. "Una integración real de Chile a la Sociedad del Conocimiento: el incremento de la inversión en Ciencia y Tecnología es condición para el desarrollo del país". 14 pp. Santiago de Chile.

ciones complementarias que aseguren la incorporación y retención de jóvenes investigadores en empresas, institutos, centros de investigación y universidades. Este conjunto de acciones incorporan, a lo menos, becas de inserción laboral para jóvenes, oportunidades reales de proyectos de investigación y financiamiento de infraestructura y equipamiento para las instituciones que acogen a nuevos investigadores.

La naturaleza multidisciplinaria de numerosas innovaciones, por sí misma, ilustra la necesidad de interacciones entre varios científicos y también con otros tipos de profesionales. Así como el propio trabajo de investigación científica ha pasado de ser, en las últimas décadas, un trabajo individual o de grupos pequeños de científicos a uno que aborda problemas de mayor complejidad a través de la interacción de un mayor número de investigadores, debe entenderse hoy que las innovaciones de base científica también demandan grupos interactuantes de científicos y tecnólogos que en conjunto resuelvan la multidisciplinariedad que demandan las innovaciones. Estas son acciones colectivas que dejan poco espacio para acciones individualistas y atomizadas. Ello reafirma la necesidad de un mayor número de investigadores en el país, conformando grupos grandes de investigadores con capacidad para incursionar tanto en investigación científica como en el desarrollo de las innovaciones. El balance muy positivo que han dejado los centros de excelencia en el país, incluyendo los Fondos en Áreas Prioritarias, los Proyectos de Financiamiento Basal y los Institutos Milenio son una muestra real de lo que se puede lograr en Chile a través de acciones colectivas y programas asociativos. Estos programas han sido particularmente fecundos en creación de conocimiento, desarrollo de innovaciones con base científica y formación de personal avanzado.

3. Instrumentos de financiamiento para investigación e innovación

Los ejemplos de innovación analizados en este volumen ilustran la importancia que los instrumentos estatales de investigación e innovación han tenido en estos desarrollos. Ello incluye tanto instrumentos administrados por Conicyt como aquellos gestionados por Corfo y, con menor frecuencia, algunos gestionados por ministerios sectoriales, como el Ministerio de Agricultura o la Subsecretaría de Pesca. Así, no cabe duda que todos ellos están aportando tanto al trabajo de investigación básica como, directa o indirectamente, a los esfuerzos más aplicados que eventualmente pueden conducir a innovaciones.

Sin embargo, y más allá del reconocimiento explícito en varias descripciones de casos de innovación, existen algunas observaciones a estos instrumentos que también debiesen ser consideradas para la formulación de políticas.

Una primera consideración es el tiempo de duración de algunos de estos instrumentos. Pensando que el desarrollo de una innovación fácilmente puede demorar 5-10 años, instrumentos cuya extensión es de 3-4 años (por ejemplo, proyectos Fondecyt, Fondef) no parecen muy apropiados para apoyar este tipo de actividad, excepto que ellos fuesen renovables. La alta productividad de los centros de excelencia (Fondap, Milenios, Basales), ya comentada, no dependió solo de un mayor financiamiento a grupos coherentes de investigadores. Ello también resultó de una extensión temporal del instrumento, mayor a 5 años, el que permite resolver problemas de mayor extensión y que con frecuencia no se pueden solucionar a través de la adición de pequeños proyectos de corta duración.

Una segunda recomendación que emana de estos trabajos se refiere a la necesidad de revisar el monto de los proyectos y el monto de inversión en ciencias en el país. En general, la inversión nacional, así como los montos de los proyectos, se considera baja, lo que a la postre resulta en una subutilización de las capacidades de la investigación instalada en el país. Hoy es bastante claro que para llegar al desarrollo es indispensable incorporar al país a una comunidad mundial en que la moneda de cambio es el conocimiento y para ello es necesario un fuerte impulso a las inversiones en Ciencia, Tecnología e Innovación, acción que Chile aún no desarrolla. En términos comparativos, en 2010 Chile invertía en C+T el equivalente a USD 53,07 *per capita*. Esta es una inversión menor a la de otros países iberoamericanos de desarrollo intermedio (por ejemplo Brasil: USD 128,58; Portugal: USD 146) y notablemente más pequeña a la que hacen países con mayor desarrollo, tales como España (USD 439) o Canadá (USD 722). Comparaciones con países con mayor desarrollo económico en el mundo ilustran todavía más la enorme brecha existente con nuestro país. Al año 2010, Israel invertía USD 1.155,6 *per capita* en C+T, Estados Unidos alcanzaba los USD 1.319,2 y Finlandia USD 1.404,8. Estos datos indican que si nuestro país desea integrarse efectivamente al camino del desarrollo, debe generar un cambio de escala en sus niveles de inversión en ciencia y tecnología en el corto y mediano plazo. En su trabajo sobre la integración real de Chile a la Sociedad del Conocimiento, la Academia Chilena de Ciencias² ha sugerido un programa de desarrollo que duplica en 4 años el monto actual de inversión en ciencia y tecnología.

Uno de los instrumentos clave en los procesos de innovación, como es el Capital de Riesgo, también evidencia limitaciones. De partida, entrevistas a numerosos emprendedores publicadas en distintos medios de difusión sugieren que hay pocos fondos realmente capacitados y que los montos actuales son insuficientes. Así, el escaso capital disponible se orienta a innovaciones de bajo riesgo, por ejemplo, innovaciones co-

2 Academia de Ciencias 2013, *opus citatus*.

merciales. Las innovaciones con base científica están entre aquellas con mayor riesgo y, en consecuencia, su frecuencia de financiamiento es baja. Esta realidad sugiere la necesidad de generar por parte del Estado (Corfo) fondos de capital semilla, especialmente orientados a innovaciones tecnológicas.

4. Incentivo y gestión de la innovación en las universidades chilenas

En Chile, el sistema universitario es el principal responsable de las actividades científicas y tecnológicas y de la creación de conocimiento. Sin embargo, y como lo describen numerosos informes, existe escasa colaboración entre las universidades y el sector productivo en materia de investigación, desarrollo e innovación. Más aún, es evidente que muchas facultades científicas carecen de dicha capacidad o no han considerado aún incorporar el desarrollo de innovaciones en su trabajo académico. Informes recientes³ han enfatizado la necesidad de progresar por esta vía, no solo para las universidades mayores del país, sino que también para las universidades regionales. Allí se enfatiza la necesidad de establecer alianzas estratégicas con otras universidades y centros de investigación, nacionales o internacionales, a fin de complementar capacidades para investigación e innovación, reforzar la infraestructura material y el capital humano para estas funciones, fortalecer el cuerpo académico a través de la inserción de nuevos investigadores en las áreas prioritarias de desarrollo e incorporar los merecimientos logrados en innovación, en las evaluaciones de desempeño y en las decisiones sobre jerarquización y progresión académica de sus profesores.

Junto con promover, capacitar e incentivar para la realización de actividades de innovación, las universidades deberían estar desarrollando procesos de gestión orientados a una mejor conexión de sus capacidades científico-tecnológicas con las necesidades nacionales y regionales; practicar un respeto amplio por la propiedad intelectual de los descubrimientos realizados y determinar normativas y regulaciones para una distribución justa y proporcionada de las regalías obtenidas de la innovación. La necesidad de racionalizar la toma de decisiones en este ámbito ya ha llevado a algunas unidades académicas a la estructuración de reglamentos y unidades internas (generalmente conocidas como unidades de transferencia) que promuevan y apoyen la generación de conocimiento aplicado y faciliten su transferencia al entorno. Convendría revisar estas experiencias y promover la adopción generalizada de las prácticas exitosas.

3 Valdivia-Dubó, V. y colaboradores (2012). Propuesta de Política. Vinculación Universidad-Entorno para la I+D y la Transferencia Tecnológica. Ministerio de Educación y Consorcio de Universidades del Estado de Chile.

5. Los conceptos de I+D+i en los procesos de formación de estudiantes

Aunque una mayoría de los autores no aborda en forma sistemática el problema de formación de estudiantes, varios manifiestan su preocupación sobre el tema. Conceptos y actividades sobre innovación y emprendimiento se han incorporado solo recientemente a los programas de educación secundaria. A nivel de educación terciaria, la oferta de formación no es general. Solo algunas carreras profesionales (por ejemplo ingeniería) parecen más accesibles que otras a estos conceptos, incorporando actividades teóricas y prácticas relacionadas con emprendimiento. En forma análoga, el desarrollo de conceptos y capacidades empresariales también se restringe a unas pocas carreras, y los cursos pertinentes no siempre están disponibles para ser seguidos por estudiantes de otras facultades.

Estas limitantes son especialmente relevantes en los estudiantes con especialización científica, una mayoría de los cuales no están siendo expuestos en forma regular a estos temas. Consecuentemente, no desarrollan intereses por estas materias. Más aún, ellos muestran escaso interés por desarrollar habilidades empresariales, lo que limita las iniciativas de emprendimiento en sus propios sectores. Del mismo modo, aquellas escuelas donde se forman mayormente las personas que ocuparán posiciones de distinta responsabilidad en el sector empresarial, rara vez exponen a sus alumnos a la riqueza, tanto cultural como en posibilidades de negocios, que ofrece el conocimiento científico contemporáneo. Vale la pena destacar aquí iniciativas como el Programa “Nueva Ingeniería para el año 2030” organizado y financiado por Corfo a principios de 2013 y que ha estado orientado a estructurar focos de desarrollo en las facultades de ingeniería del país sobre la base de investigación aplicada, desarrollo y transferencia de tecnología, innovación y emprendimiento. Parece recomendable sugerir programas equivalentes para facultades científicas y algunas facultades profesionales, a fin de enriquecer las posibilidades de formación de los estudiantes en áreas con directa proyección en innovación y emprendimiento.

Complicaciones adicionales se observan en facultades y universidades donde se desea impulsar el trabajo de innovación a través de la investigación científica. Con frecuencia no existen los mecanismos y procedimientos que permitan, por ejemplo, la realización de tesis doctorales sobre temas con información confidencial o privilegiada. En forma análoga, y como ya se indicó, si bien se considera meritoria la producción de trabajos científicos en la carrera académica de algunas universidades, no siempre existe una consideración similar por la producción de patentes o licenciamientos.

A todo lo anterior se agrega la ausencia o desarrollo muy incipiente de actividades multidisciplinarias, sea esta expresada en los procesos de

formación de estudiantes de doctorado o en actividades de investigación científica o tecnológica. La mayoría de las facultades científicas de universidades de investigación del país mantienen poca interacción con otras facultades científicas, incluso de la misma universidad. De hecho, con frecuencia, en un afán de reforzar o impulsar las actividades disciplinarias, se dificultan las posibilidades de actividades multidisciplinarias, llevando a una pobreza notable de interacciones entre grupos que, de otra forma, podrían realizar aportes significativos, interactuando con otros grupos de científicos de otras facultades o universidades. Varios de los ejemplos de innovación descritos en este volumen son un testimonio de la existencia de esas interacciones y del riquísimo potencial que ellas encierran.

El conjunto de deficiencias descritas en las páginas anteriores sugiere que si se desea usar innovación con base científica para el desarrollo del país, se deben impulsar programas apropiados en varios niveles de formación. A través de diversos mecanismos, la educación básica debiera cuidar y estimular la curiosidad natural de los niños acerca del mundo que los rodea. La educación secundaria, que involucra adolescentes, debiera aprovechar su espíritu de aventura y romanticismo e incorporar conceptos y actividades pertinentes en los ámbitos de innovación, investigación científica, emprendimiento y capacidad de gestión. Sobre todo, se debería evitar atiborrarlos de información que, sin estimularlos, los puede paralizar. También hay elementos fundamentales que, aun cuando bien sabidos, es necesario no olvidar: En todos los niveles, pero mientras antes mejor, es necesario estimular el cumplimiento de los deberes, el trabajo bien hecho, y la honestidad intelectual. Del mismo modo, es necesario mejorar lo que parece ser una deficiente capacidad de lectura, escritura y de habilidades matemáticas elementales. La formación terciaria debería también contener actividades de formación en todos los ámbitos ya mencionados, no solo restringidas a unas pocas carreras con futuro empresarial, sino que para una mayoría de los estudiantes interesados y muy especialmente para aquellos que continuarán carreras científicas. Asimismo, las carreras con futuro empresarial debieran incorporar elementos que permitan a sus estudiantes tomar conciencia de las posibilidades que ofrecen la investigación científica y el desarrollo tecnológico. Por su parte, y como ya se indicó, las distintas facultades debieran hacer esfuerzos para estimular las actividades multidisciplinarias de investigación y formación. En general, se puede concluir que los procesos formativos y de generación de conocimiento que se están entregando en nuestra educación secundaria y terciaria aún no descubren la importancia de la investigación científica y la innovación como motor de progreso. En consecuencia, no han orientado sus actividades hacia tales propósitos.

Finalmente, el papel esencial jugado por las universidades sugiere revisar al alza la fracción de recursos admisibles como costos indirectos en

los distintos instrumentos de I+D+i administrados por estas instituciones. La experiencia internacional sugiere valores de 35-40 %, alcanzables en forma gradual en los próximos 4 años.

6. Apropiación y uso de resultados; el sector productivo

Los resultados de los casos estudiados de innovación efectuada en Chile muestran que las posibilidades de apropiación y uso de la innovación generalmente la realizan instituciones o individuos del ámbito empresarial más bien que científicos que han practicado la investigación. Esto es así también en el resto del mundo. Con frecuencia, en esta etapa los científicos participantes asumen funciones de asesoría o discusión en la realización de *spin-off* derivado del proyecto, pero difícilmente asumen funciones de liderazgo comercial. Además de posibles problemas de formación, muchos científicos concuerdan en que un mayor involucramiento comercial constituiría un desvío de sus intereses principales, que siguen radicados en investigación científica o tecnológica. Esta realidad determina la necesidad de analizar las empresas a la luz de los comentarios formulados en los distintos casos de innovación.

Las descripciones indican que en el país no es fácil encontrar empresas o industrias dispuestas a compartir los riesgos de desarrollar una innovación con base científica. Las razones parecen ser múltiples, incluyendo monto de recursos por comprometer, riesgos involucrados y tiempo de desarrollo. Algunas de estas empresas han tenido una historia en cuanto a implementar tecnologías que han permitido innovación en distintos rubros, pero con frecuencia eso ha derivado de la adquisición de *know-how* en el extranjero, el que han aplicado en el país. La carencia en muchas de estas instituciones de capital humano avanzado o la ausencia en su estructura de un departamento, sección o unidad de I+D+i determina una capacidad baja para conocer, apreciar progresos nacionales en Ciencia y Tecnología e incorporarlos a sus desarrollos.

En este ambiente, con frecuencia no se entienden ni se aprecian los beneficios que puede traer la innovación. Como se indica en algunos de los relatos de los ejemplos de innovación contenidos en este volumen, cuando hay programas de financiamiento público orientado a esos propósitos, los recursos a veces se orientan a mejorar instalaciones productivas o procesos de mercadeo y de control de calidad. Muchas de estas empresas siguen dependiendo de subsidios estatales, con escasa o ninguna inversión en innovación tecnológica.

A todas las limitantes anteriores se deben sumar las oscilaciones económicas internacionales que en algunos períodos han afectado fuertemente a la industria nacional, limitando la disponibilidad de recursos que se pudiesen orientar hacia la innovación. A ello se agrega el escaso

conocimiento a nivel nacional de casos exitosos de innovación basados en conocimiento científico, como los 15 ejemplos incluidos en este volumen y que esperamos servirán de ejemplo para futuros desarrollos. Finalmente, la falta de conexión entre los problemas que inspiran la investigación científica en los mejores núcleos del país y los problemas reales de la sociedad también atenta contra estos desarrollos. En efecto, para muchos de nuestros mejores grupos de investigadores, el desafío principal se encuentra con frecuencia en la frontera del conocimiento de la disciplina, mientras que los problemas de la realidad nacional a menudo se perciben como con menor originalidad, poco trascendentes a nivel científico y que no constituyen prioridad en el ámbito de investigación. Por último, es necesario no perder de vista el hecho que usualmente, en todo el mundo, las motivaciones que animan a un investigador científico son distintas de las motivaciones que animan a un emprendedor con ánimo de lucro.

Esta compleja realidad, probablemente, explica por qué las interacciones academia-empresa con respecto a innovación de base científica son todavía infrecuentes en el país. Se podría sugerir una batería de instrumentos específicos de financiamiento, como programas especiales de estímulo a las innovaciones con base científica. Alternativamente, se podrían diseñar programas de estímulo al desarrollo de pequeñas empresas que implementen y apliquen nuevas tecnologías con base científica. Un tema que merecería especial atención es el de empresas formadas por jóvenes graduados (doctores), capaces de desarrollar ideas originales y riesgosas. El concepto se aproxima al actual programa "Valorización de la Investigación en la Universidad" (VIU) de Fondef, pero debiera contar con montos superiores de recursos, abiertos a grupos de posdoctorados y otros investigadores, con formación suficiente para acometer innovaciones tecnológicas con base científica. Se podría también sugerir el revisar los regímenes de créditos de impuestos, incrementando los montos para innovaciones con base científica debido a sus riesgos reconocidamente mayores que otros tipos de innovación. Parece, además, recomendable una revisión completa de la relación universidad-empresa basada en la evidencia acumulada en casos como los analizados en este libro. Además de diseñar instrumentos más realistas, que efectivamente estimulen el involucramiento de la empresa en futuros desarrollos, la nueva evidencia debiera ayudar a calibrar mejor las posibilidades de contribución financiera del sector privado en el financiamiento de I+D+i en Chile.

Las expectativas de financiamiento privado de I+D+i sugeridas por distintos gobiernos en los últimos 25 años han variado de 0,2% a 0,8% del PIB, careciendo de base cuantitativa de sustentación para tales proyecciones. Dichos valores, en general, reproducen situaciones de otros países y parecen deseables para Chile. Sin embargo, pareciera no haber análisis documentado sobre la evolución temporal de las contribuciones del sector privado en I+D+i en el país o sobre la efectividad de los

estímulos e instrumentos usados para impulsar esas contribuciones. Se recomienda que Corfo lidere el análisis y la discusión sobre este tema, cuyo conocimiento en profundidad será de la mayor importancia para configurar las expectativas de la ciencia, la tecnología y la innovación en Chile. Dicho estudio debiera también evaluar las probabilidades reales de que los recursos de la empresa privada logren en el mediano o largo plazo remplazar el muy importante rol del Estado en el inicio de las innovaciones como las aquí descritas.

Síntesis

En resumen, el análisis de los ejemplos de innovación incluidos en este volumen permite formular una serie de observaciones y conclusiones explícitas en las páginas anteriores. A su vez, dichas reflexiones y conclusiones permiten formular las 15 sugerencias principales que se resumen en la Tabla final de este capítulo. Ellas van precedidas por dos consideraciones que pueden parecer obvias, pero que es necesario no ignorar.

Tabla de observaciones, conclusiones y sugerencias derivadas de los casos de innovación incluidos en este libro

Consideraciones previas

1. La estabilidad económica y política de la nación es indispensable para poder desarrollar iniciativas que necesitan entre 5 y 30 años para su maduración. Es necesario no descuidar esa estabilidad.
2. Para que la innovación basada en el conocimiento científico se transforme en una actividad central a la sociedad chilena, no solamente es necesario contar con sus protagonistas (científicos, emprendedores, financistas) sino también con una comunidad nacional educada, que, al nivel más básico, sea capaz de comprender la necesidad de esta actividad y justificar su financiamiento. Lo mismo para quienes están en posiciones de tomar decisiones, así como de elaborar e implementar políticas. Y también es necesario un nivel educacional mínimo para la vasta comunidad de personas (auxiliares, administradores, empleados en general) que trabajan en el entorno de ella. Los resultados de encuestas realizadas durante más de diez años, comunicados a través de la prensa, que indican niveles muy pobres de comprensión de lectura y de habilidades matemáticas básicas entre los adultos chilenos, apuntan a un problema sustancial, cuya solución debiera enfrentarse con urgencia.

Observaciones	Conclusiones	Sugerencias
Tema 1: Investigación básica e innovación		
1. Todos los casos de innovación se iniciaron como estudios de ciencia básica.	No hay desarrollo sin investigación científica e innovación.	Fortalecer ambas actividades.
Tema 2: Abundancia de científicos		
2. Parte importante de la responsabilidad del desarrollo recae en investigadores talentosos y motivados.	Se requiere un mayor número de investigadores que puedan interactuar en pro de innovaciones.	Formular y ejecutar un programa de formación, inserción y retención de investigadores a mediano (5-8 años) y más largo plazo (15 años) que incremente muy significativamente el número de investigadores.
3. Los problemas de inserción de nuevos investigadores inciden en la disponibilidad de capital humano avanzado.	El retorno desde programas de formación en el extranjero y de formación en Chile harán crisis en el futuro inmediato.	Adoptar un conjunto de acciones complementarias para incorporar y retener en Chile a los miles de jóvenes investigadores que volverán al país en los próximos años.
4. La multidisciplinariedad es necesaria en numerosos tipos de innovaciones.	Se necesitan acciones colectivas a través de grupos interactivos de científicos y tecnólogos.	Estimular el desarrollo de programas asociativos (Fondap, Basales, Milenio), que permitan interacciones, complementariedad de trabajo y multidisciplinariedad.
Tema 3: Instrumentos de financiamiento		
5. Hay instrumentos que han mostrado ser útiles y productivos.	Deben continuar, con las modificaciones que la experiencia indique.	Reforzarlos y evaluarlos.
6. El desarrollo de una innovación demora al menos entre 5 y 10 años.	Algunos instrumentos no alcanzan en tiempo, excepto que se les haga renovable.	Revisar su aplicación.
7. Los recursos para la investigación e innovación parecen pequeños.	La comparación con otros países de desarrollo intermedio y mayor exhibe la enorme brecha de Chile con respecto a los recursos orientados a ciencia y tecnología.	Cambiar la escala en la inversión estatal en ciencia y tecnología, duplicando la inversión en 4 años.

Observaciones	Conclusiones	Sugerencias
Tema 4: Incentivo y gestión de la innovación		
8. El sistema universitario no ha incorporado la innovación entre sus acciones prioritarias	Hay una creciente necesidad de incorporar estas actividades al desarrollo académico.	Formular programas coherentes que permitan investigación e innovación en las distintas instituciones en el país.
9. Es necesario capacitar e incentivar para lograr una gestión efectiva de las actividades de innovación.	Es necesario dictar normativas, y estructurar unidades internas, para apoyar la generación y transferencia del conocimiento aplicado.	Proceder a las modificaciones estructurales y reglamentarias necesarias para acelerar estos procesos, a partir del aprendizaje obtenido con las experiencias ya realizadas.
10. La gestión de la innovación necesita estructuras ágiles y flexibles.	Es difícil administrar un centro de I+D+i usando la estructura de administración del Estado.	Promover la estructuración de los centros a través de una personalidad jurídica propia, cautelando los intereses de las instituciones albergantes.
Tema 5: Los conceptos de I+D+i en la formación de estudiantes		
11. Falta formación sobre innovación y emprendimiento en niveles secundarios y terciarios.	Estas deficiencias son limitantes serias para la formación multidisciplinaria de los estudiantes.	Estructurar y ofrecer actividades de formación con varios focos de desarrollo, que mezclen investigación con habilidades empresariales, transferencia y emprendimiento.
12. Falta de interacción interfacultades de la misma o de distintas universidades.	Esfuerzo para reforzar las actividades intrafacultades están dificultando la multidisciplinariedad.	Aumentar las interacciones interfacultades e interuniversitarias.
13. La base para la innovación basada en el conocimiento está en las universidades.	Los recursos para infraestructura, equipamiento y funcionamiento son insuficientes, generando desincentivos a la innovación.	Aumentar los recursos imputables a costos indirectos, llegando a 40% en 4 años.
Tema 6: Apropiación y uso de resultados		
14. y 15. En Chile no resulta fácil encontrar empresas o industrias dispuestas a compartir riesgos para desarrollar una innovación con base científica.	Por muchas razones, las interacciones academia-empresa con respecto a innovación con base científica son infrecuentes en el país.	• Diseñar una batería de programas de estímulo. • Revisar la relación universidad-empresa y analizar críticamente la efectividad de los estímulos usados para impulsar las contribuciones del sector privado.

Índice de autores

A

Adame 224, 231
Adjei-Nsiah 35, 51
Aguilera 266, 267, 270, 271
Alexandre 224, 231
Almazán 11, 13, 125
Álvarez 28, 29, 40, 51, 209, 232
Alzamora 91, 96, 97
Andalaf 203, 209
Appendini 218, 231
Araneda 11, 13, 83
Arias 57, 58, 77
Aroca 90
Arthur 29, 206, 209
Ashford 246, 250
Azeredo 221, 223, 231

B

Bacigalupo 12, 13, 235
Baeza 278, 284
Baeza-Yates 11, 13, 147, 167
Banchereau 273
Bankenhol 69
Beall 224, 231
Bermúdez 219, 231
Bird 203, 209
Bobadilla 5, 199, 204, 206, 209
Boomsma 109, 116
Boroschek 132, 137
Bown 8, 11, 13, 99, 111, 277, 281, 282, 284, 286
Boxshall 22
Bozinovic 12, 13, 169, 278, 281, 284
Bracomente 165
Branch 239, 250, 251
Bravo 22, 165
Brokering 11, 13, 83
Brown 172, 177, 181
Bugusu 217, 232
Burkhart 111
Buschmann 9, 11, 13, 15, 16, 17, 20, 28, 29, 275, 281, 282, 284, 285
Bustos 165

C

Cáceres 35, 43
Caro 165
Castilla 9, 12, 13, 17, 29, 237, 238, 239, 240, 242, 245, 250, 251, 252, 253
Castillo Velasco 131
Chakraborty 273
Chang 273
Choudalakis 221, 232
Cipriano 90
Claro 90
Conca 8, 9, 12, 13, 187, 201, 204, 209, 210, 279, 281, 284
Craya 203, 209
Cui 206, 207, 209

D

Davy 17, 29
Defeo 242, 245, 251, 252
Delgado 68, 82
del Río 11, 13, 33
Dempster 11, 13, 15
Devia 203, 209
Donoso 12, 13, 169, 175, 178, 181
Dormon 35, 51
Doyle 264, 270
Drucker 173, 181
D'Souza 172, 181
Duarte 16, 29
Dunn 11, 13, 99
Durán 65, 239, 240, 251, 252
Dürr 69

E

Epstein 106
Espinoza 90
Estades 173, 181, 182

F

Fagerlund 207, 209
FAO 29, 36, 102, 109, 245, 251
Fenton 104, 116
Fernández 29, 202, 209, 237, 251, 252

Fierro 12, 13, 257
Figdor 265, 270
Flewelling 111
Floros 217, 232
Franco 221, 222, 223, 232
Friedmann 180, 181
Fuentealba 90
Fuentes 12, 13, 187, 204, 209, 210, 211

G

Gajewsky 273
Galluzzi 262, 271
Galotto 12, 13, 213, 217, 226, 232, 233
García 111, 166, 270
Geiger 203, 209
Gelcich 237, 242, 245, 251, 252, 253
Godoy 11, 13, 15, 19, 29, 210, 211, 240, 252
González 28, 165, 166, 167, 270, 271
Gormaz 12, 13, 187, 210
Gotsis 221, 232
Gower 108, 116
Guarda 12, 13, 213, 217, 218, 220, 226, 232, 233

H

Han 218, 219, 232
Hardin 236, 252
Hartwich 36, 51
Hasegawa 223, 232
Heresi 131
Higuera 11, 13, 99, 112, 123
Hilborn 241, 245, 252
Hoefele 203, 209, 210
Holmes 69
Hotchkiss 218, 231
Hucke-Gaete 248, 252
Hunter 109, 116, 234

I

Infante 11, 13, 29, 33
Inostrosa-Psijas 165, 166

J

Jarvis 108, 116
Jiménez 11, 13, 83, 233
Johnsen 108, 109, 116
Jonuleit 273

K

Kapusta 195, 203, 210
Kasai 130, 137
Kelly 131
Khambadkone 93, 96
Kimmins 108, 116
King 191, 210
Kiwi 12, 13, 213, 279, 281, 282, 284
Klerkx 35, 51
Kokini 222, 233

L

Lambert 219, 232
Landsberg 108, 109, 116, 117
Laroche 172, 181
Laroze 111
Lasserre 11, 13, 99
Lau 273
Lazcano 11, 13, 33
LeBaron 223, 232
Lemay 111
Letelier 112, 123
Lett 20, 29
Loayza 112, 123
Lobos 165, 166, 167, 175, 181
Lonchay 264, 271
López 267, 270, 271, 274
Ludueña 224, 232
Lund 3, 10, 12, 13, 57, 275, 289
Luraschi 173, 182, 203

M

Mackenson 273
Mäkelä 108, 117
March 166, 217, 232
Marín 11, 14, 26, 147, 165, 166, 167
Marino 220, 232
Martínez 12, 14, 29, 206, 210, 257
Mason 111
Maspocho 221, 222, 223, 232
Massone 128, 137
Matus 179, 182
McClanahan 245, 252
Mead 111
Medina 17, 29
Meller 208, 210
Melvin 247, 252
Meza 90
Moncada 59, 60, 78, 80, 81

Monckeberg 11, 14, 33
 Morán 11, 14, 83
 Morawiec 223, 232
 Moreno 12, 14, 90, 235, 239, 240, 246,
 247, 248, 250, 252, 253
 Moroni 11, 14, 125, 132, 134, 137
 Myers 109, 117

N

Navarrete 29, 239, 253
 Neira 11, 14, 33, 35, 43, 137
 Nelson 36, 51
 Nercelles 64
 Nestle 262, 271, 273
 Niebuhr 112, 123
 Novoa 12, 14, 169
 Novotny 93, 96

O

Olivares 11, 14, 15, 25, 29
 Orellana 267, 271
 Osman 224, 232
 Otaíza 64
 Oyarzún 165, 166, 167
 Ozdemir 217, 232

P

Palma 11, 14, 82, 83, 90, 277, 281, 282,
 284
 Palza 11, 14, 53, 68, 69, 79, 82
 Panelli 273
 Paredes 28, 106, 209, 211
 Pastenes 11, 14, 33, 35, 43
 Paul 223, 233
 Peña 9, 11, 14, 33, 276, 281, 282, 284
 Peña-Neira 35, 43
 Pereira 218, 233
 Peters 11, 14, 99, 112, 117, 123
 Pinochet 68, 82
 Pizarro 173, 182, 210
 PNUMA 171, 182
 Pohlenza 64
 Poirier 203, 209
 Pomareda 36, 51
 Pontt 84, 91, 92, 96, 97
 Prado 65, 252
 Proe 108, 117
 Pu 130, 137
 Puchi 203, 210

Puente 202, 204, 210
 Püschel-Hoeneisen 174, 182

Q

Quijada 10, 11, 14, 53, 57, 58, 59, 60,
 68, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 276, 281,
 284, 286
 Quintero 217, 222, 224, 233

R

Raison 109, 117
 Ramírez 226, 248, 270
 Ramos 218, 233, 271
 Ranieri 273
 Ray 221, 233
 Rayo 203, 210
 Real 112, 123
 Retamales 11, 14, 125
 Reyes 253, 270, 271
 Robeson 223, 233
 Rodríguez 84, 91, 92, 96, 97, 224, 232,
 233
 Rojas 11, 14, 53, 62, 128, 137, 165,
 181, 210
 Röling 36, 51
 Romero 173, 182
 Rosales 203, 204, 209, 210, 211
 Roseblatt 9, 12, 14, 257, 280, 281,
 284
 Rubilar 226, 232, 250, 252
 Rudnick 11, 14, 83
 Ruz 12, 14, 187, 204, 207, 209, 210

S

Salazar 12, 14, 82, 257, 262, 266, 267,
 268, 270, 271, 274, 280
 Salinas 204, 210
 San Martín 204, 210
 Santelices 3, 10, 12, 14, 275, 289
 Sapiain 90
 Sarrazin 11, 14, 125, 132, 137, 278,
 281, 284
 Schmidt 65
 Scholz 173, 182
 Schuler-Thurner 273
 Schumpeter 258, 271
 Schurman 238, 239, 253
 Schwarze 187, 197, 198, 199, 200, 203,
 206, 209, 210

Sepúlveda 25, 29, 165, 233
Shula 111
Silva 29, 90
Simonetti 12, 14, 169, 174, 181, 182
Slater 35, 51
Smithers 273
Smith-Palmer 220, 233
Somerville 111
Soto 29, 137, 203, 211, 252
Sozer 222, 233
Stutzin 12, 14, 257
Suppakul 218, 219, 233
Sutton 104, 116
Syamujulu 202, 204, 211
Szekely 191, 203, 211

T

Takayama 135, 137
Themelis 191, 203, 211
Thomas 35, 51
Thomason 69
Turner 273
Tobar 11, 14, 99, 123
Tola 36, 51
Toro 58, 59, 77, 78, 79, 80
Trincado 111

U

Uddin 222, 233
Ultee 220, 233
UN 172, 182

V

Valdivia 5, 117, 294
Valencia 123, 204, 211
Valenzuela 208, 211, 226, 232
Valerio 11, 14, 15
Vallebuona 261, 271
Vanclay 108, 117
Vargas 11, 14, 53
Vega 173, 182, 253
Vicente 218, 233
Vidal 90, 219, 233
Vidala 65
Villegas 174, 182
Voisin 12, 14, 187, 211
von Carlowitz 101
von Loebenstein 197, 198
Vukovic 219, 233

W

Wada 130, 137
Warczok 206, 211
Waring 109, 116, 117
Weintraub 106
Weiss 224, 234
Whalers 172
White 102

X

Xie 223, 234

Y

Yazdani-Pedram 58, 59, 77, 78, 79, 80

Z

Zamora 165