



**Centro UC**

CAPES - Center of Applied Ecology & Sustainability

# EL ROL DE LA TEORÍA ECOLÓGICA EN EL AVANCE DE LA SUSTENTABILIDAD EN CHILE

Francisco Bozinovic, Stefan Gelcich,

Rosanna Ginocchio, Bernardo González,

Fabian M. Jaksic y Mauricio Lima

Pontificia Universidad Católica de Chile

Facultad de Ciencias Biológicas

Centro de Ecología Aplicada y Sustentabilidad (CAPES-UC)

[www.capes.cl](http://www.capes.cl)



# EL ROL DE LA TEORÍA ECOLÓGICA EN EL AVANCE DE LA SUSTENTABILIDAD EN CHILE

Francisco Bozinovic, Stefan Gelcich, Rosanna Ginocchio, Bernardo González,  
Fabian M. Jaksic y Mauricio Lima

MAYO 2018

Los autores, en orden alfabético, son al mismo tiempo los investigadores principales del  
Center of Applied Ecology & Sustainability (CAPES)

Pontificia Universidad Católica de Chile  
Facultad de Ciencias Biológicas  
Centro de Ecología Aplicada y Sustentabilidad (CAPES-UC)  
[www.capes.cl](http://www.capes.cl)

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Centro de Ecología Aplicada y Sustentabilidad (CAPES-UC) por la oportunidad para desarrollar este libro y a CONICYT-PIA (FB 0002-2014) por el financiamiento.



# INDICE DE CONTENIDOS

---

- 2 AGRADECIMIENTOS
- 5 PALABRAS DEL DIRECTOR
- 7 INTRODUCCIÓN
- 9 MARCOS TEÓRICOS Y CASOS DE ESTUDIO: LOS GRUPOS DE INVESTIGACIÓN QUE  
COMPONEN EL CENTRO DE EXCELENCIA CAPES
- 9 1. ENRIQUECIMIENTO DE METALES EN EL AMBIENTE: DESDE LA EVALUACIÓN DE LOS  
RIESGOS ECOLÓGICOS AL APOYO EN SU REMEDIACIÓN  
Casos de Estudio: Caracterización Adecuada del Riesgo y Acciones de Remediación  
de los Suelos Degradados Químicamente y de Relaves en Sitios Mineros
- 13 2. LOS PROCESOS MICROBIANOS QUE PROTEGEN EL AMBIENTE  
Casos de estudio: Procesos Microbianos que Subyacen a la Protección Ambiental
- 16 3. FISILOGIA AMBIENTAL Y CAMBIO CLIMÁTICO  
Casos de Estudio: Fisiología, Cambio Climático e Invasión de Especies en Chile
- 18 4. TEORÍA DE POBLACIONES Y LA DINÁMICA DE LOS SISTEMAS SOCIO-ECOLÓGICOS  
Casos de Estudio: Pesquerías Demersales Chilenas, Sociedades Agrarias Humanas y  
la Dinámica de Cultivos Sustentables
- 22 5. GESTIÓN Y POLÍTICA DE RECURSOS NATURALES SOSTENIBLES  
Casos de Estudio: Pesquerías Costeras Chilenas y Conservación de la Biodiversidad
- 25 CONCLUSIONES
- 27 ANEXOS
- 31 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



## PALABRAS DEL DIRECTOR

El futuro de la humanidad depende de la transición hacia la sustentabilidad, en escalas que van desde lo local a lo global. Como una manera de hacer frente a este desafío, el Centro de Ecología Aplicada y Sustentabilidad (CAPES) se centra en la generación y transferencia de conocimiento original y en la formación de capital humano avanzado para alcanzar el desarrollo sustentable en Chile. Nuestra estrategia es involucrar a las empresas privadas y las agencias estatales a través de contratos directos o licitaciones, para elevar y perfeccionar las normas vigentes en conformidad con las leyes y reglamentos nacionales e internacionales. Además, buscamos establecer "buenas prácticas" e identificar nuevas vías para lograr transformaciones políticas en sistemas socio-ecológicos.

El Centro proporciona una plataforma de enfoques interdisciplinarios para resolver problemas prácticos para lograr la sustentabilidad. Esto se logra a través de la generación y la transferencia de conocimiento aplicado, interdisciplinario y relevante que emerge de cinco líneas de investigación independientes, pero interrelacionadas. Estas líneas son: **Línea 1, Enriquecimiento del medio ambiente por metal: desde efectos a soluciones;** **Línea 2, Procesos microbianos y protección del medio ambiente subyacente;** **Línea 3, Fisiología Ambiental;** **Línea 4, Teoría de Poblaciones para predecir la dinámica de los sistemas socio-ecológicos, y** **Línea 5, Gestión sostenible de recursos naturales y política.**

A través de la interacción entre las líneas, el Centro busca identificar nuevas oportunidades para lograr el desarrollo sustentable y la transferencia de conocimiento. En consonancia con el enfoque

interdisciplinario requerido para alcanzar el desarrollo sustentable, los métodos de diversas ciencias ecológicas, sociales, eco-toxicológicas, económicas y políticas son parte de la caja de herramientas para avanzar hacia formas sustentables. Los enfoques experimentales también juegan un papel fundamental para generar nuevos enfoques y planes de monitoreo. Los métodos incluyen manipulaciones experimentales en los sistemas socio-ecológicos, tanto marinos como terrestres, el modelamiento de los impactos, series de tiempo y análisis de políticas de recursos naturales. Estos enfoques experimentales se llevan a cabo a diferentes escalas y teniendo en cuenta las políticas nacionales existentes como experimentos naturales.

La transferencia de conocimientos es un componente crítico de nuestro Centro, y se aborda a través de dos vías. Por una parte, desde el lado de la oferta, basados en la creatividad científica, pero canalizados hacia aspectos aplicados y por la otra, desde el lado de la demanda, atendiendo a las necesidades de los agentes privados, gubernamentales y no gubernamentales. El Centro prevé la colocación de nuestros estudiantes, doctorantes y postdoctorantes en departamentos de medio ambiente de empresas privadas, y a su vez ofreciendo servicios técnicos complejos que los actores puedan requerir de nosotros (incluyendo el diseño de protocolos experimentales y estadísticos, auditorías ambientales de Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA) complejos, litigios ambientales, legislación y política ambiental). Los resultados de las líneas de investigación del Centro proporcionan las plataformas necesarias para un proceso de reaprendizaje entre los actores productivos y académicos.

El Centro está diseñado para superar la falla frecuentemente abordada de traducir la comprensión científica en práctica y política. De hecho, nuestro Centro transfiere conocimiento directamente desde los científicos que lo generan tanto hacia el sector público como hacia las instituciones relacionadas con la gestión de la pesca, la biodiversidad, la silvicultura, la salud humana y la producción agrícola. Es importante destacar que la transferencia de conocimientos ya se ha conseguido con las empresas privadas de consultoría ambiental, que son actualmente un vínculo crítico entre los grandes proyectos de desarrollo y los evaluadores de impacto ambiental. El intercambio de conocimientos y la transferencia hacia estas empresas de consultoría permiten al Centro llenar una brecha entre la ciencia y la política, al permitir desarrollar, experimentar y eventualmente cambiar las "prácticas" como una forma de elevar el nivel del desarrollo sustentable en la creciente economía chilena.

En resumen, CAPES se centra en la generación y transferencia de investigación interdisciplinaria aplicada orientada a la resolución de problemas en los sistemas socio-ecológicos con el objetivo de lograr un desarrollo sustentable. En la era actual de los ecosistemas dominados por el hombre y la biosfera afectada por la acción humana, desde la escala local a la global, tal perspectiva está ganando terreno rápidamente en la ciencia en todo el mundo, se le otorga gran prioridad entre las fuentes de financiamiento, y está en la demanda de la interfaz ciencia-políticas públicas-prácticas. Es por esto que creemos que nuestro centro representa un rol clave en la búsqueda de soluciones innovadoras y rutas políticas encaminadas hacia un futuro sustentable.



## INTRODUCCIÓN

La teoría ecológica es una herramienta fundamental para explicar cómo funcionan los sistemas naturales y así poder construir una relación sustentable entre las sociedades humanas y el mundo natural. Comprender la estructura y función de la naturaleza y de los sistemas socio-ecológicos es hoy un gran desafío para las generaciones presente y futuras a fin de desarrollar sociedades equitativas y sustentables (Kates y cols., 2001; Cumming & Peterson, 2017). La investigación sobre sustentabilidad se ocupa de varios problemas complejos e interrelacionados como, por ejemplo: 1) estudiar los límites del crecimiento de la población y el crecimiento económico en las sociedades actuales y la posibilidad de sobrepasar los límites ambientales del funcionamiento de los ecosistemas, 2) estudiar cómo los procesos ecológicos y evolutivos desde los individuos y poblaciones hasta comunidades pueden responder a las forzantes del cambio global y cómo las actividades económicas de los seres humanos pueden ser modificadas para adaptar y restaurar el funcionamiento de ecosistemas enfrentados a procesos de degradación o sobreexplotación.

Cuando se considera el concepto de sustentabilidad en la toma de decisiones en conservación y uso de recursos naturales, existe una creciente necesidad de nuevas y mejores formas de conectar a las personas con la naturaleza. Bajo el uso y explotación de los recursos naturales desde la revolución industrial, las sociedades han puesto sus necesidades muy por encima de las capacidades de operación de los sistemas naturales produciendo desequilibrios relevantes. Las consecuencias actuales sobre el clima, la calidad del suelo, aire y el agua, la biodiversidad, y los servicios ecosistémicos, entre otros, son ahora evidentes. Por lo tanto, para realmente lograr un desarrollo sustentable hacia el futuro, se necesitan consideraciones y aplicaciones más sólidas de la teoría, los conceptos y los métodos de las ciencias ecológicas.

Una variedad de actores a nivel local, regional y mundial están involucrados en el desafío de construir marcos de referencias para alcanzar el desarrollo sustentable, aun cuando éstos tienen diferentes puntos de vista, percepciones y valores sobre la contribución de la naturaleza a las personas (Pascual y cols., 2017). Con ello, se han generado diferentes iniciativas a nivel mundial para fortalecer las interfaces entre los usuarios para así alcanzar el desarrollo sustentable y una mejor conservación de los recursos naturales. Por ejemplo, la Plataforma Intergubernamental sobre Diversidad Biológica y Servicios Ecosistémicos (IPBES) se creó en 2012 con el objetivo de "fortalecer la interfaz ciencia-política para la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas para la conservación y el uso sustentable de la biodiversidad, el bienestar humano a largo plazo y el desarrollo sustentable" (<http://www.ipbes.net>). En 2015, la IPBES lanzó un marco conceptual innovador, construido a través de un proceso participativo, que consideró diversas disciplinas científicas, partes interesadas y sistemas de conocimiento, incluido el conocimiento indígena y local (Díaz y cols., 2015). Sin embargo, la ciencia de la ecología y su aplicación en conservación y el uso y la explotación de los recursos naturales por parte de los seres humanos, debe ser la piedra angular de dichas iniciativas. Por lo tanto, las ciencias ecológicas tienen un papel clave y una responsabilidad en iniciar el camino hacia una conexión más equilibrada entre las personas y la naturaleza, una que asegure el bienestar humano a largo plazo y de manera holística. Se necesita con urgencia desarrollar un mayor conocimiento ecológico experto en conservación, uso sustentable y explotación de los recursos naturales para apoyar una mejor toma de decisiones por parte de otros actores (ej. reguladores, empresarios, comunidades, productores).

En este sentido, el Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas (PNUMA, 2010) definió a una nueva economía mundial como la serie de procesos

productivos destinados a mejorar el bienestar humano, además de reducir los riesgos ambientales asociados con la producción de bienes y servicios. Estos procesos deben estar basados en investigación y desarrollo de investigación ecológica básica y aplicada. En la carrera de Chile por convertirse en una sociedad del conocimiento, más desarrollada y sustentable en el ámbito internacional se requiere de la ejecución de proyectos de desarrollo (esto es, minería, energía, conectividad, industria de recursos naturales) teniendo el debido respeto con las leyes y políticas ambientales. La sociedad, las entidades ministeriales en medio ambiente, los Servicios de Evaluación Ambiental y los Tribunales, por ejemplo, requieren de conocimientos técnicos, los cuales han sido proporcionados esencialmente y en paralelo por universidades y firmas privadas de consultoría. En Chile, la evaluación ambiental de los proyectos se ha vuelto cada vez más sofisticada, pues se ha realizado un esfuerzo sostenido para satisfacer los requisitos de nuestros socios estratégicos internacionales. Al convertirse en miembro de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), hoy nuestro país debe ajustarse a normas y guías ambientales aún más estrictas. Nuestra evaluación de la situación es que el estado está luchando para seguir el ritmo, y que las empresas privadas apenas lo mantienen. Dentro de este marco, para cubrir los

requerimientos tanto de las empresas como de entidades estatales en el ámbito práctico y político, es indispensable poseer una fundación sólida (teórica y conceptual) en biología y ecología básica y aplicada.

Los seres humanos están conectados y dependen de otros seres vivos. En este contexto, nuestra propuesta es que cuando la investigación utiliza la teoría biológica, ecológica y sociológica, puede proporcionar soluciones a problemas globales que directamente dependen de organismos vivos, como la agricultura, la pesca y los sectores económicos forestales, pero también a sectores sociales que podrían beneficiarse al incorporar la teoría científica dentro de los sistemas sociales humanos (Figura 1).

Por lo tanto, al utilizar los siguientes cinco ejemplos seleccionados, principalmente en áreas de biología y ecología, demostraremos cómo los programas básicos de investigación y la teoría ecológica pueden proporcionar una plataforma operativa importante para poner en práctica enfoques interdisciplinarios y así lograr resolver problemas prácticos y aproximarse a alcanzar la sustentabilidad. A continuación, vamos a ilustrar estas propuestas en diferentes niveles de organización biológica indicando cada marco teórico seguido de casos reales de estudio en Chile.



**Figura 1.** Suma de cuerpos teóricos y metodológicos interdisciplinarios orientados a generar colaboración hacia una solución integrada de sustentabilidad



## MARCOS TEÓRICOS Y CASOS DE ESTUDIO: LOS GRUPOS DE INVESTIGACIÓN QUE COMPONEN EL CENTRO DE EXCELENCIA CAPES

### 1. ENRIQUECIMIENTO DE METALES EN EL AMBIENTE: DESDE LA EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS ECOLÓGICOS AL APOYO EN SU REMEDIACIÓN

Diversas actividades productivas (ej. producción agrícola intensiva) e industriales (ej. operaciones mineras metálicas, fundición de metales) se caracterizan por causar un enriquecimiento del medio ambiente con diversos elementos traza, tales como cobre (Cu), níquel (Ni), cadmio (Cd) y plomo (Pb) además de metaloides como el arsénico (As). Al conjunto de estos elementos los denominaremos a continuación simplemente como metaloides (Alloway, 2013; Ettler, 2016; Hou y cols., 2017). Algunas faenas causan impactos inmediatamente alrededor de sus operaciones o sitios productivos, mientras que otras los generan a grandes distancias del sitio de producción. Algunos de estos impactos derivan de operaciones históricas o antiguas prácticas productivas mientras que otros derivan de actividades actuales. De cualquier forma, los ecosistemas marinos, costeros, de agua dulce y terrestres se han visto sistemáticamente afectados por estas actividades humanas, provocando degradación química de los sistemas (Alloway, 2013; Naser, 2013; de Souza Machado y cols., 2016). La degradación química de matrices medioambientales por causa del enriquecimiento de metaloides impone riesgos potenciales para los seres humanos, la vida silvestre y las propias actividades productivas actuales (ej. agricultura, acuicultura), con consecuencias económicas, sociales y ambientales

significativas según lo indicado por diferentes estudios desarrollados en todo el mundo (Alloway, 2013; Beyer y cols., 2014; Li y cols., 2014). Un aspecto relevante sobre los efectos que pueden tener los metaloides en los organismos es que no están relacionados con la concentración total incorporada a la matriz ambiental (ej. suelo, agua de mar, agua dulce) sino más bien al grado de exposición de los organismos a la concentración que es biológicamente activa de los metaloides, denominada fracción biodisponible (Figura 2; Ginocchio y cols., 2006; Alloway, 2013).

Este hallazgo científico ha tenido fuertes implicancias en el establecimiento de regulaciones ambientales adecuadas para los metaloides, tales como los estándares de calidad del suelo o del agua. Por ello, en las últimas décadas a nivel internacional se han desarrollado muchas investigaciones para crear métodos y/o modelos analíticos químicos precisos (ej. modelo de ligando biótico acuático o BLM por sus siglas en inglés) para determinar fácilmente la fracción biodisponible de un metaloide en diferentes matrices ambientales y sus posibles efectos en los organismos. Sin embargo, esta tarea ha sido particularmente difícil en el caso de los suelos, ya que la biodisponibilidad de un metaloide en el suelo depende de la solubilidad del compuesto químico que lo contiene y de varias condiciones específicas del sitio mismo, como clima, características fisicoquímicas del suelo y el grado de sensibilidad o tolerancia de los organismos expuestos (Figura 3; Casale y cols. 2011; Alloway, 2013).

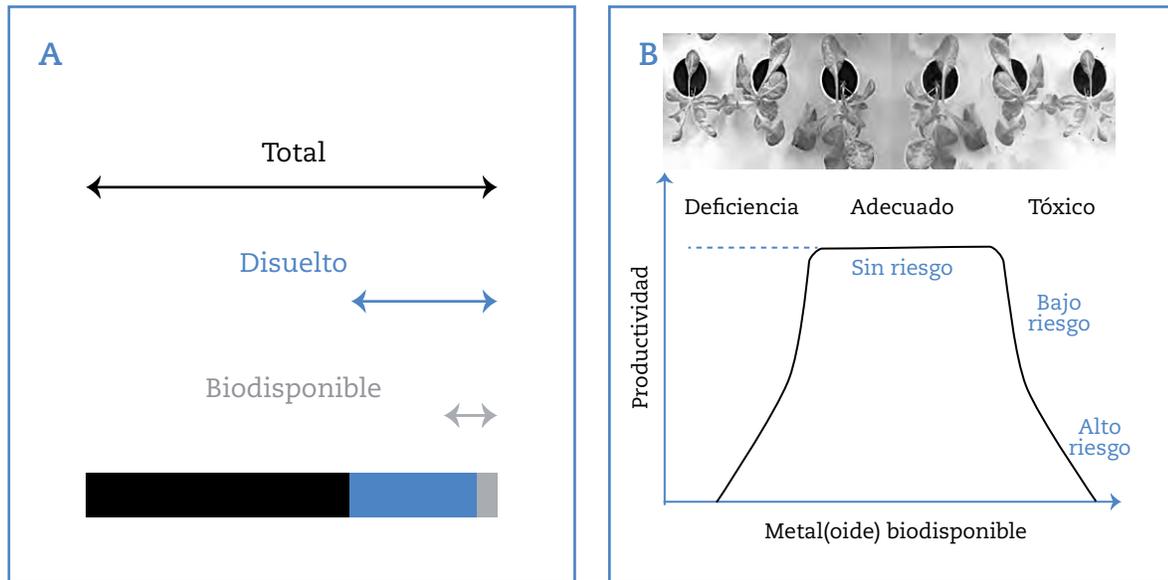


Figura 2. Representación genérica (A) de la relación cuantitativa entre la fracción total de un metal, la disuelta y la biodisponible en un suelo cualquiera y (B) de la relación entre la dosis biodisponible de un metal, el tipo de efecto biológico posible de producirse y el tipo de riesgo ambiental. La línea continua del gráfico representa el comportamiento para metales esenciales para los organismos, mientras que la línea punteada representa el comportamiento para los metales que no son esenciales para los seres vivos.

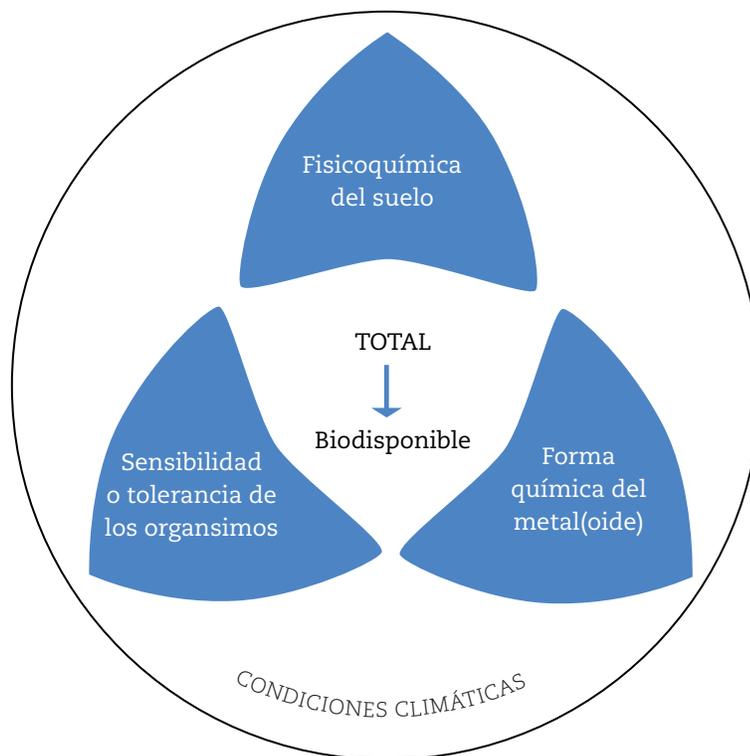


Figura 3. Factores de los que depende la biodisponibilidad de un metal(oide) en un suelo cualquiera.

Cuando se demuestra la degradación química de las matrices ambientales con metaloides, con riesgos significativos para los seres humanos, la vida silvestre y/o las actividades productivas, se requiere entonces de acciones de remediación. La investigación básica y aplicada es necesaria para desarrollar metodologías y tecnologías costo-efectivas para reducir o eliminar los riesgos ambientales generados por los metaloides.

En Chile, el enriquecimiento de matrices ambientales con metaloides ha sido muy relevante en las áreas del norte y centro del país debido a la producción minera y las actividades agrícolas intensivas. A pesar de esto, los estudios sobre estos temas han sido bastante recientes, escasos, de corto plazo y muy dispersos y/o especializados. Por un lado, las regulaciones ambientales en Chile son bastante recientes (en general, desde la década de 1990), están aún en desarrollo o son nulas. Por el otro, las regulaciones existentes no son siempre bien fiscalizadas o no existe una institucionalidad ambiental adecuada. Estos problemas han obstaculizado los procesos de toma de decisiones por parte de los interesados en todos los niveles, dando lugar a conflictos socio-ambientales. Por lo tanto, consideramos que esta línea de investigación debe desarrollarse según las mejores herramientas científicas disponibles en el ámbito de la ecología básica y aplicada, teniendo siempre en consideración los marcos históricos, sociales y biogeográficos particulares de Chile. Esta información debe estar disponible para todas las partes interesadas con el fin de atender sus necesidades dentro de un contexto de desarrollo ecológicamente sustentable para el país. En nuestra opinión, la investigación debe enfocarse en actividades industriales seleccionadas y priorizadas, ecosistemas ecológicamente relevantes y modelos biológicos para continuar comprendiendo: 1) las respuestas de los organismos al enriquecimiento de metaloides a nivel fisiológico, molecular, individual, comunitario, ecosistémico y paisajístico (ej. mecanismos de tolerancia, cambios en la calidad del suelo y del agua, cambios en la biodiversidad y servicios del ecosistémicos); 2) la movilidad, biodisponibilidad y toxicidad de los metaloides en las matrices ambientales; y 3) los cambios estructurales, funcionales, históricos y sociales. Esta información nos permitirá i) desarrollar herramientas metodológicas apropiadas para evaluar los efectos y riesgos

del enriquecimiento con metaloides en los ecosistemas impactados ii) diseñar y optimizar protocolos para programas de remediación asistida, iii) diseñar e implementar programas de divulgación específicos, en conjunto con las partes interesadas pertinentes; y iv) trabajar de manera proactiva con las empresas y los reguladores de forma de diseñar e implementar las mejores prácticas que apunten a un desarrollo ecológicamente sustentable. A continuación, presentamos algunos casos de estudio en investigación y desarrollo.

### **Casos de Estudio: Caracterización Adecuada del Riesgo y Acciones de Remediación de los Suelos Degradados Químicamente y de Relaves en Sitios Mineros.**

Tal como lo demuestran los estudios de investigación en ecología básica realizados por el grupo dirigido por **Rosanna Ginocchio**, las operaciones históricas de fundición de cobre desarrolladas en la bahía de Quintero en el centro de Chile (antes del establecimiento de las regulaciones ambientales en la década de 1990) provocaron una fuerte degradación química del suelo en una amplia zona del valle Puchuncaví. Específicamente, los suelos superficiales se acidificaron y enriquecieron con metales (cobre, plomo, cadmio, zinc, entre otros) y Arsénico (As). Tanto la cobertura como la diversidad vegetal se redujeron fuertemente en dirección a la fundición (Figura 1 de Anexos; Ginocchio, 2000; Ginocchio y cols., 2004; Neaman y cols., 2009; Verdejo y cols., 2015). Como efecto secundario, los suelos desnudos y químicamente degradados fueron expuestos a la erosión del viento y la lluvia, lo que condujo a la degradación física, con pérdida importante de materia orgánica y nutrientes (Figura 1 de Anexos; Ginocchio, 2000). En estas condiciones, acciones de remediación son requeridas para poder revertir la degradación química del suelo y detener los procesos erosivos gatillados. Si bien existen tecnologías físicas y químicas disponibles para remediar los suelos químicamente degradados, el grupo de Ginocchio ha estado desarrollando métodos de remediación in situ basados en el uso de plantas nativas locales (uso del banco de semillas remanente aún en el suelo degradado) y mejoradores de suelo, una metodología conocida como fitoestabilización asistida (Mench y cols., 2000).

La fitoestabilización asistida es efectiva para la inmovilización in situ de metaloides biodisponibles en suelos contaminados, pero requiere una adecuada selección de: 1) mejoradores de suelo, los cuales deben estar localmente disponibles y ser de bajo costo, y de 2) especies de plantas nativas / endémicas, aptas a las condiciones edafoclimáticas del lugar (Ginocchio & León-Lobos, 2011). La identificación y determinación de la eficacia de los residuos disponibles localmente (ej. lodo de plantas de tratamiento de aguas servidas domiciliarias o biosólidos; residuos orgánicos derivados de actividades agrícolas o ganaderas) que pueden ser usados como mejoradores o enmiendas de los suelos degradados de la zona han sido ampliamente estudiadas por el grupo de Ginocchio (Córdova y cols., 2011; Cárcamo y cols., 2012; Ginocchio y cols., 2013). Hasta ahora, han desarrollado una metodología de remediación efectiva y ambientalmente segura para suelos degradados física y químicamente ubicados cerca de la fundición de cobre (Ginocchio & León-Lobos, 2011), basada en el uso de residuos como enmiendas de suelos y de plantas locales, la que ha sido probada y validada en condiciones de campo (Figura 2 de Anexos; Cárcamo y cols., 2012). El desarrollo de esta tecnología ha sido financiado principalmente por fondos nacionales de investigación y desarrollo tecnológico y ha involucrado a diversas entidades relevantes (reguladores como el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), CODELCO-Ventanas, Aguas Andinas y Sociedad Nacional de Minería (SONAMI), entre otros), para su validación e implementación.

Por otro lado, se han establecido recientemente en Chile regulaciones para el cierre de las faenas e instalaciones mineras, las cuales exigen una estabilización química y física adecuada para los depósitos de relaves post-operativos (TSF, proveniente del inglés tailings storage facilities). Al no ser estabilizados, los TSF quedan expuestos a la movilización física de los relaves ricos en metaloides a las áreas cercanas (Figura 3 de Anexos) y/o a sufrir una transformación química secundaria con la consiguiente generación de drenaje ácido de mina y lixiviación de metaloides con los potenciales riesgos ambientales que esto representa (Casale y cols., 2011). Las tecnologías basadas en el uso de plantas y enmiendas (fitoestabilización asistida) también han sido desarrollados por el

grupo de Ginocchio para la estabilización de los TSF post-operativos generados por la gran minería del cobre presentes en el centro-norte del país (Figura 3 de Anexos; Ginocchio & León-Lobos, 2011). En este caso, los relaves (un residuo mineral) deben ser artificialmente transformados en un sustrato similar al suelo donde la microbiota, los nutrientes, la textura y otras características químicas son mejoradas para crear formaciones vegetales autosustentables (Ginocchio & León-Lobos, 2011; Santibañez y cols., 2012). Se han requerido grandes esfuerzos en investigación para la identificación de los residuos apropiados para ser usados como enmiendas de suelo. Estos deben estar disponibles en grandes volúmenes en las áreas donde se establecen los TSF y ser de bajo costo. Adicionalmente, deben ser mejoradores efectivos para permitir el establecimiento y crecimiento de las plantas y para la inmovilización in situ de los metaloides biodisponibles. Por consiguiente, el concepto de gestión integrada de residuos orgánicos e inorgánicos para la remediación basada en el uso de plantas ha sido bien incorporado por el grupo (Ginocchio y cols., 2016). Una vez identificados los residuos disponibles localmente, se verifica su eficacia en condiciones controladas de laboratorio y, posteriormente, en condiciones de campo a pequeña escala (Gandarillas y cols. *In prep.*; Santibañez y cols., 2011; Verdugo y cols., 2011; España y cols., 2016). De igual modo, se trabaja en la identificación de especies de plantas nativas que pueden introducirse en los TSF (Ginocchio y cols., 2017). Estas especies deben estar adaptadas a las condiciones climáticas semiáridas existentes en la zona de interés y a las condiciones del sustrato mineral (relave); además se deben desarrollar los mejores métodos para su propagación y posterior trasplante o siembra en el campo (Ovalle y cols., 2015; Ovalle y cols., 2016; de la Fuente y cols., 2017a; de La Fuente y cols., 2017b). El desarrollo de esta tecnología para el cierre de los TSF post-operativos ha sido financiado principalmente por fondos nacionales de investigación y compañías mineras de cobre, involucrando a todos los actores relevantes (reguladores como el Servicio Nacional Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Ministerio de Minería de Chile, Ministerio de Medio Ambiente de Chile, CODELCO-El Teniente, Aguas Andinas, Agro-Super y Sociedad Nacional de Minería (SONAMI), entre otros), para su validación e implementación.

## 2. LOS PROCESOS MICROBIANOS QUE PROTEGEN EL AMBIENTE

Los microorganismos desempeñan papeles esenciales en la naturaleza, tanto en entornos habitados solamente o en su mayoría por microorganismos (por ejemplo, fuentes termales, salinas), como en aquellos donde las plantas y los animales, incluidos los humanos, normalmente viven en estrecha asociación con ellos. Por lo tanto, para buscar soluciones basadas en conocimiento en áreas productivas relevantes, es esencial estudiar el papel de los microbios en la protección del medio ambiente, así como la ecología funcional a nivel de especie, población y comunidad (Verstraete & De Vrieze, 2017). El conocimiento sobre las funciones microbianas específicas proporciona pistas importantes sobre cómo mejorar, detectar y controlar las

características y funciones que los microbios ejercen solos o en asociación con los macroorganismos. Por ejemplo, controlar enfermedades infecciosas, ayudar a limpiar ambientes contaminados, mejorar la calidad y los rendimientos en la producción de alimentos, desarrollar nuevas biotecnologías, entre otras (Timmis y cols., 2017). Como los requerimientos para comprender las funciones microbianas en las actividades de protección productiva y ambiental son enormes, su correcto abordaje requiere una selección de procesos microbianos relevantes involucrados, en este caso, en actividades productivas claves tanto a nivel país como regional; éstas son: (1) promoción del crecimiento de plantas impulsado por bacterias (2) bio(fito)remediación bacteriana y (3) funciones bacterianas en ambientes extremos y sometidos a estrés (Figura 4).

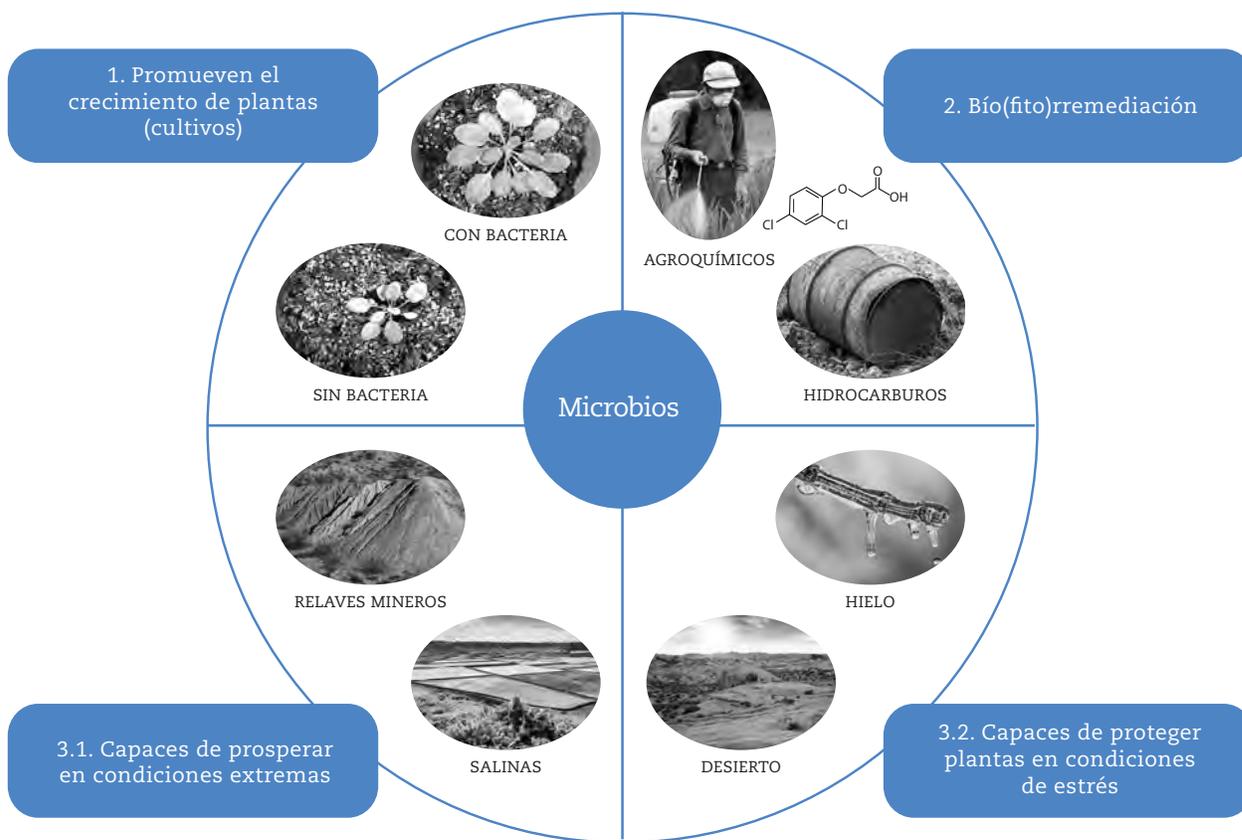


Figura 4. Algunas de las funciones que desempeñan los microbios que ayudan a proteger el medio ambiente y a promover el desarrollo sustentable.

La primera tarea debe ser abordada a través de la investigación básica de los mecanismos moleculares que explican la promoción del crecimiento vegetal por bacterias seleccionadas (rizobacterias de promoción del crecimiento de las plantas – PGPR; Wackett, 2017), enfocándose especialmente en aquellas que permiten el reemplazo o menor uso de agroquímicos (pesticidas y fertilizantes), la protección contra enfermedades infecciosas mediante la competencia biológica contra los fitopatógenos y el uso de nuevos conocimientos aplicados al mejoramiento en el crecimiento (y mejores respuestas de las plantas a los nutrientes, metales, salinidad, estrés hídrico y/o químico) de los cultivos de importancia. Estos estudios fundamentales deben complementarse con la investigación aplicada realizada mediante ensayos de invernadero y de campo.

La segunda tarea requiere un estudio sistemático (genómico y metagenómico) del potencial bacteriano para mineralizar, degradar o transformar contaminantes peligrosos (derivados del petróleo, compuestos clorados, entre otros; Dvořák y cols., 2017). Esto permite definir las herramientas moleculares (marcadores genéticos) necesarias para evaluar el potencial de restauración efectivo de las comunidades microbianas en diferentes ambientes contaminados (por ejemplo, suelos plantados, derrames de petróleo costeros, dependencias de estaciones de servicio). También se necesitan herramientas analíticas y de software mejoradas para abordar la efectividad del uso de los enfoques de bio(fito)remediación.

La tercera tarea es concentrarse en investigación básica que explique cómo los microbios prosperan en ambientes extremos y estresados (por ejemplo, salinas, pilas de lixiviación), biominería (biolixiviación y producción de drenaje ácidos de minas) y fenómenos de biocorrosión y bioincrustación. Tanto los enfoques en cultivos como los independientes de cultivo, permiten reconocer patrones de respuestas microbianas generales y específicas que ayudan a definir la relevancia del componente microbiano en los distintos entornos o contextos de estrés ambiental.

La realización de estas tres tareas sienta las bases para una mejor definición sobre las reglas generales de las respuestas microbianas en diferentes

contextos y puede mejorar la calidad de la predicción de procesos microbianos de relevancia ecológica. Por lo tanto, las soluciones basadas en el conocimiento; por ejemplo, disminuciones en el uso de agroquímicos haciendo que la producción agrícola sea competitiva, procedimientos ecológicamente amigables a fin de introducir exportaciones en mercados fuertemente regulados y el cumplimiento de la nueva y estricta regulación del cierre de faenas mineras en relación a las áreas productivas claves chilenas y regionales, permiten que la ciencia integradora sea relevante para el desarrollo económico y social. El valor e innovación de la investigación básica y aplicada actual que hemos estado llevando a cabo se ilustra a continuación a través de tres casos de estudio.

#### **Casos de estudio: Procesos Microbianos que Subyacen a la Protección Ambiental**

La investigación básica desarrollada sobre los mecanismos moleculares que explican el efecto de promoción del crecimiento de las plantas por parte de bacterias seleccionadas (PGPR) ha permitido al grupo de **Bernardo González** saber que las plantas al enfrentar el estrés hídrico y salino activan la expresión de genes específicos. Algunos de estos genes están relacionados con la producción de moléculas protectoras de osmolaridad, reguladores específicos de la transcripción y transportadores. A su vez la compleja red de señales hormonales de las plantas también juega un rol en la respuesta mediadas por bacterias (Pinedo y cols., 2015; Poupin y cols., 2016; Aquea y cols., 2017). Estudios sobre las interacciones planta-bacteria, han utilizado el modelo PGPR *Paraburkholderia* (anteriormente *Burkholderia*) *phytofirmans*, el cual permite hacer una descripción detallada de: el recambio de fitohormonas como las auxinas (Donoso y cols., 2017); la compleja red regulatoria de la señalización mediante “Quorum sensing” (Zúñiga y cols., 2017); la inducción de la respuesta de resistencia sistémica inducida por fitopatógenos (Timmermann y cols., 2017); y el papel de nuevos compuestos volátiles en la protección de las plantas frente a los efectos del estrés salino (Ledger y cols., 2016).

Las actividades realizadas con la aplicación de PGPR a cultivos de tomate y papa en dicho programa de investigación permiten fundamentalmente

que se logre una transferencia tecnológica, lo que conduce a un desarrollo y comercialización de procedimientos basados en microbios que ayudan a la promoción del crecimiento de plantas con una reducción significativa en el uso de agroquímicos y control de fitopatógenos. Más detalles no pueden ser presentados en la actualidad ya que el grupo de González está llevando a cabo el proceso de protección de la propiedad intelectual requerido (PGPR Composiciones y métodos para el cultivo de tomate y especies de papa, Solicitud de Estados Unidos No 15/115.539US Basado en la solicitud de patente internacional PCT/US16/31372, Solicitud Provisional No. 62 /159,055).

La investigación básica para un mejor entendimiento de los procesos de bio(fito) remediación está relacionada con el estudio sistemático del potencial bacteriano para mineralizar, degradar o transformar contaminantes peligrosos. Estos aspectos de la investigación han sido cubiertos utilizando modelos bacterianos (los que poseen habilidades para combatir contaminantes aromáticos, resisten contaminantes metálicos y/o ayudan a las plantas a tolerar el estrés nutricional) en interacción con el modelo de planta *Arabidopsis thaliana* y sus exudados de raíz, en condiciones de cultivo frente a estrés nutricional (el que es comúnmente encontrado en ambientes contaminados), o la presencia de contaminantes orgánicos y/o inorgánicos. Por ejemplo, en un estudio de la contaminación con cobre en *A. thaliana* - *Cupriavidus metallidurans* se revelaron efectos interesantes sobre las interacciones con estas bacterias (tanto positivas como negativas, dependiendo del nivel de contaminación del metal), en la protección de plantas y la translocación y secuestro de contaminantes metálicos, que

son aspectos claves para planificar el uso de enfoques de fitoremediación (Clavero-León y cols. *In prep.*). Por otro lado, el uso de la PCR para la detección de funciones catabólicas, en este caso rastrear la presencia de oxigenasas aromáticas bacterianas claves en ambientes contaminados con petróleo, es fundamental para la toma de decisiones apropiadas sobre procedimientos de biorremediación, sean bioestimulación o bioaumentación, ha sido aplicado con éxito sobre suelos fuertemente contaminados con petróleo crudo, suelos con ligera contaminación por derivados diésel y en efluentes de procedimientos de extracción de petróleo de esquisto (fracking; Araneda y cols. *In Prep.*).

El uso de PCR para la detección de las funciones catabólicas por parte de este grupo de investigación ha despertado el interés de Neotecnos S.A., una compañía chilena líder en la aplicación de procedimientos de remediación o restauración. Esta compañía, junto con proporcionar fondos adicionales para realizar más pruebas de campo, ha llevado a cabo la firma formal de un contrato de investigación con el grupo de Gonzalez sobre "Nuevas técnicas para el diagnóstico y tratamiento de suelos contaminados con combustibles".

Finalmente, la investigación básica está también relacionada con los efectos ambientales de los compuestos metálicos e inorgánicos (sales), incluyendo los procesos de biominería. La investigación aplicada a este campo se ha llevado a cabo sobre el uso de procedimientos basados en microbios para ayudar a las plantas nativas a colonizar los residuos mineros de cobre, lo que permite probar tecnologías de fitoestabilización (Gacitúa y cols. *In Prep.* ; Menares y cols., 2017).

### 3. FISILOGIA AMBIENTAL Y CAMBIO CLIMÁTICO

Los científicos ambientales se han centrado tradicionalmente en los atributos de las especies, las poblaciones y las comunidades, y en los indicadores de las respuestas a las perturbaciones antrópicas. Sin embargo, una explicación de los mecanismos subyacentes a los problemas de conservación es cada vez más importante para la toma de decisiones, en parte porque los instrumentos y conocimientos fisiológicos son útiles para poder desarrollar relaciones de causa-efecto y para identificar el rango óptimo de hábitats y umbrales de estresores para diferentes organismos (Cooke y cols., 2013). Desde el punto de vista del grupo liderado por **Francisco Bozinovic**, los biólogos de la conservación y los gestores ambientales deben incorporar la información fisiológica en los modelos ecológicos y económicos, para mejorar las predicciones de las respuestas de los organismos al cambio ambiental y así proporcionar herramientas para apoyar las decisiones de gestión. Sin tal conocimiento, se puede llegar a predicciones erróneas al considerar sólo asociaciones simples. Además, el grupo de Bozinovic considera que la fisiología de la conservación incluye una amplia gama de aplicaciones; por ejemplo, control y erradicación de especies invasoras, el refinamiento de las estrategias de gestión de recursos para minimizar los impactos y la evaluación de los planes de restauración. Este concepto de fisiología ecológica ambiental realza la base, importancia y relevancia de la fisiología a diferentes escalas (Wikelski & Cooke, 2006). Se piensa que la falta de conocimiento fisiológico es el principal impedimento para la predicción exitosa de los efectos ecológicos y económicos de los rápidos cambios ambientales actuales, como el cambio climático (Denny & Helmuth, 2009). En la opinión del grupo de Bozinovic, las investigaciones sobre este aspecto deberían centrarse en al menos cuatro puntos fuertes principales: (1) Los mecanismos causales subyacentes a la adaptación frente a los impulsores del cambio global, abarcando una amplia variedad de taxones nativos pero también especies exóticas, plagas y cultivos. (2) Los problemas ambientales actuales asociados con el cambio global, en los que se examina la adaptación, o la falta de ella. (3) Los temas básicos de relevancia aplicada en los campos de las ciencias y políticas ambientales, así como de biomedicina, veterinaria y

agronomía. (4) La investigación de patrones, procesos e implicaciones de dicha diversidad con el análisis de las bases fisiológicas en la expresión de los rasgos dentro de amplias escalas geográficas y temporales.

#### Casos de Estudio: Fisiología, Cambio Climático e Invasión de Especies en Chile

La investigación en esta área ha demostrado que el cambio global -incluida la variabilidad climática y las especies exóticas en Chile- puede influir en los procesos ecológicos a múltiples escalas de organización biológica, desde individuos hasta poblaciones y comunidades, y desde procesos fisiológicos hasta procesos ecológicos y evolutivos. Aunque las respuestas a la variabilidad climática suelen ser complejas y no siempre pueden generalizarse, la variabilidad climática representa un componente importante del clima con consecuencias biológicas potencialmente profundas. Por ejemplo, en una serie de artículos (Bozinovic y cols., 2016a; b; Vázquez y cols., 2017) se mostró que los escenarios de cambio climático predicen una tendencia al aumento de las temperaturas promedio, la variabilidad climática y la frecuencia de los extremos climáticos. La tesis es que, aunque los ecólogos y los biólogos evolutivos ampliamente reconocen los impactos potenciales de los cambios de las condiciones climáticas promedio, se ha prestado relativamente poca atención a los impactos potenciales de los cambios en la variabilidad climática y los extremos. Bozinovic y su grupo analizan los impactos de la variabilidad climática y los extremos en los procesos fisiológicos, ecológicos y evolutivos de la organización biológica a múltiples niveles. Ellos señalan que la variabilidad climática puede tener profundas influencias en los procesos biológicos a múltiples escalas de organización. La respuesta al aumento en la variabilidad climática es probablemente compleja y no siempre se puede generalizar, aunque las herramientas metodológicas y conceptuales permiten hacer predicciones informadas sobre las posibles consecuencias de dichos cambios climáticos. La variabilidad climática representa un componente importante del clima que merece mayor atención. Por otra parte, el rendimiento individual está modulado por la respuesta de los organismos a las condiciones climáticas cambiantes ya sea por adaptación o por plasticidad fenotípica. El aumento de la variación ambiental

debería conducir a un aumento de la plasticidad fenotípica, una predicción respaldada por nuestros estudios sobre animales ectotérmicos. Aunque el aumento de la plasticidad se ve favorecido por la mayor variación climática, en realidad depende del tipo de selección que está operando, la cual está influenciada por los factores selectivos que actúan, los rasgos involucrados y los mecanismos que determinan la respuesta evolutiva a la selección. Por ejemplo, Cortes y cols. (2016) probaron el efecto de la interacción entre dos impulsores del cambio global, a saber, el cambio climático y la biología de las invasiones. De hecho, las invasiones biológicas son reconocidas como un componente biótico importante del cambio global que amenaza la composición, estructura y funcionamiento de los ecosistemas, lo que resulta en la pérdida de biodiversidad y el desplazamiento de las especies nativas. Si bien las características ecológicas que facilitan el establecimiento y la diseminación de especies no autóctonas son ampliamente reconocidas, se sabe poco acerca de los atributos de los organismos subyacentes al éxito de la invasión. Estos autores, estudiaron el efecto de la aclimatación térmica (asociada al calentamiento global) sobre la tolerancia térmica y el rendimiento locomotor en la rana invasora africana *Xenopus laevis* y la rana chilena nativa *Calyptocephalella gayi* (Figura 4 de Anexos). Se observaron valores más altos de rendimiento fisiológico en *X. laevis* en comparación con *C. gayi*. Por otro lado, la especie invasora mostró valores de tolerancia térmica menor en comparación con la nativa. Además, encontraron que ambas especies tienen la capacidad de aclimatar su desempeño locomotor y su límite de tolerancia térmica inferior a bajas temperaturas. Estos resultados demuestran que *X. laevis* tiene un mejor desempeño que *C. gayi*. Curiosamente, en ambas especies los límites térmicos críticos inferiores y superiores están más allá de las temperaturas mínimas y máximas encontradas en la naturaleza durante el mes más frío y el más caluroso, respectivamente. En general, estos hallazgos sugieren que tanto *X. laevis* como *C. gayi* serían resilientes a las predicciones de calentamiento del clima en Chile.

Dentro de la misma línea, Boher y cols., 2016 evaluaron los efectos combinados de la media y la varianza de la temperatura sobre la expresión de la proteína de choque térmico (hsp90) en adultos

de la mosca invasora de la fruta *Drosophila melanogaster* y la *Drosophila gaucha* chilena en el hábitat mediterráneo de Chile central. Las moscas son ecológicamente importantes porque proporcionan servicios ecosistémicos tales como la polinización. Observaron, bajo estas condiciones experimentales que la expresión de hsp90 era mayor en las especies invasoras y estaba ausente en la especie nativa. Aparentemente, el origen biogeográfico y la conservación de nicho están jugando un rol en la respuesta al choque térmico de estas especies bajo diferentes escenarios putativos de cambio climático. Estos mecanismos implican la evolución de la capacidad de respuesta.

En general, el cambio global plantea una de las mayores amenazas para la biodiversidad. Es probable que las actividades antropogénicas conduzcan a un incremento de la frecuencia de extremos climáticos (ej. olas de calor y sequías o inundaciones severas), así como a una mayor variabilidad climática en ciertas regiones del mundo, incluido Chile (Rahmstorf & Coumou, 2011). Rahmstorf & Coumou señalan que los enfoques teóricos y empíricos indican que el calentamiento global afecta tanto a las temperaturas medias de los ambientes locales, como a la magnitud de la variación temporal y estacional de la temperatura. De hecho, además del aumento de las temperaturas medias en la Tierra, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (Solomon y cols., 2007) predice aumentos en eventos extremos como las olas de calor. Es probable que el aumento en la frecuencia de eventos ambientales extremos tenga un impacto aún mayor sobre la biodiversidad que el aumento en las temperaturas promedio. Aunque los impactos potenciales del calentamiento son ampliamente reconocidos por los ecólogos, los estudios en ecología térmica se han centrado principalmente en el impacto de los cambios en los valores promedio. La variabilidad en estas condiciones (ej. los eventos de temperatura extrema) podría ser tan importante como los valores promedio, y también podría ser una fuerza selectiva importante sobre los organismos en las comunidades biológicas naturales y agroindustriales chilenas.

#### 4. TEORÍA DE POBLACIONES Y LA DINÁMICA DE LOS SISTEMAS SOCIO-ECOLÓGICOS

La dinámica de poblaciones, la economía y la demografía humana comenzaron con Malthus, donde la idea central es que el crecimiento poblacional está limitado por los recursos. Cuando el crecimiento de la población rebasa los recursos disponibles se producen "controles positivos". La teoría de ecología de población tiene profundas implicaciones para abordar la interfaz de los problemas ecológico-social-económico. La ecología ha sido criticada en el pasado por su falta de poder práctico y predictivo (Peters, 1991); esta crítica descansa sobre la actitud de muchos biólogos de que no existen leyes o incluso principios teóricos básicos que rijan los sistemas ecológicos (Berryman, 1991). La teoría ecológica general es necesaria para explicar las causas de la dinámica de cambios en sistemas ecológicos y humanos específicos y en particular, la aplicación de la teoría de poblaciones (Berryman & Lima, 2006). Además, este tipo de investigación produce ciencia básica y transfiere predicciones y estrategias de gestión a instituciones públicas y privadas que se ocupan de la gestión pesquera, el control de plagas, la producción de alimentos y la salud humana. En particular, los marcos teóricos de la ecología de poblaciones permiten colaborar con instituciones públicas que se ocupan de la compleja interacción entre los recursos naturales (pesca/rendimiento de los cultivos), los sistemas humanos (enfermedades humanas y demografía/ economía) y sus respuestas comunes al cambio global. Existe un creciente interés y preocupación por comprender la interacción entre el crecimiento de la población humana y la sustentabilidad de los recursos naturales (Motesharrei y cols., 2014). De hecho, algunos autores han planteado la posibilidad de un agotamiento y despoblamiento de recursos en las sociedades modernas (Butler, 2000, 2004), mientras que otros piensan que las sociedades humanas pueden lograr un desarrollo sustentable, equilibrando el desarrollo económico y el crecimiento poblacional (Galor & Weil, 2000).

##### Casos de Estudio: Pesquerías Demersales Chilenas, Sociedades Agrarias Humanas y la Dinámica de Cultivos Sustentables

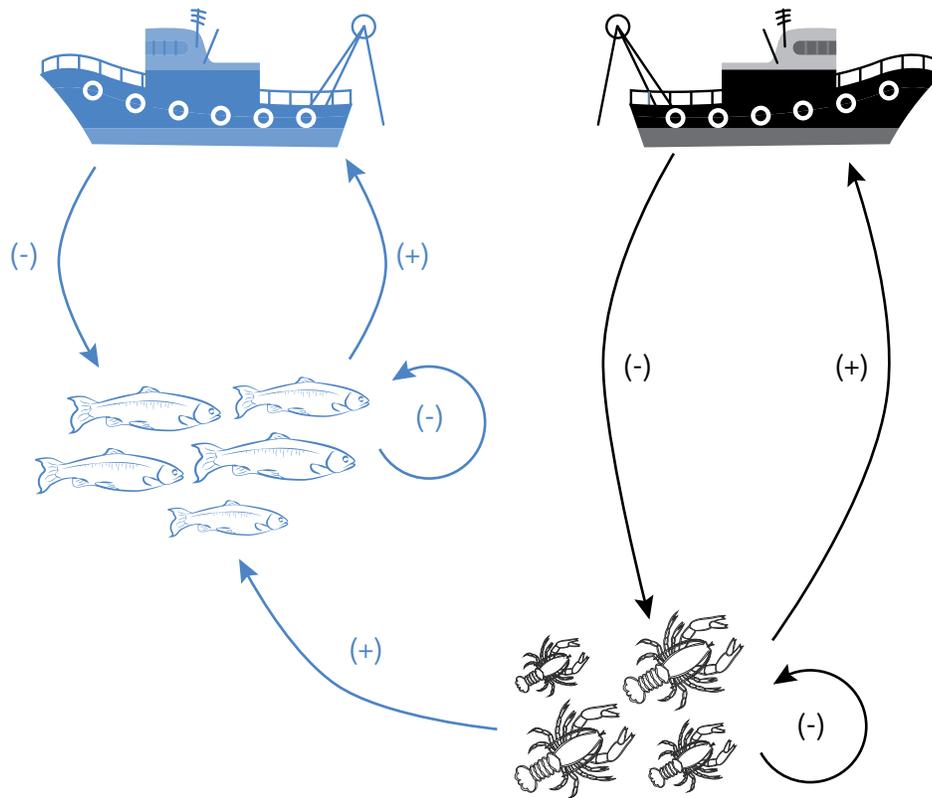
En el grupo de investigación liderado por **Mauricio Lima**, se han centrado en entender como las interacciones entre procesos biológicos, actividad

humana y variabilidad climática pueden determinar la dinámica de poblaciones naturales. Un primer caso de estudio trata sobre el colapso de las pesquerías demersales chilenas. Las poblaciones de peces marinos chilenos han sido agotadas a niveles insostenibles durante las últimas décadas y un caso paradigmático es la pesca demersal de Chile central. Es el caso de la merluza chilena (*Merluccius gayi gayi*) y la langosta roja (*Pleuroncodes monodon*), cuyas biomásas reproductoras se han visto extremadamente reducidas en comparación con los niveles no explotados, causando graves problemas ecológicos y socioeconómicos. Una gestión para la pesca basados en los ecosistemas (EBMF del inglés "ecosystem-based management for fisheries"), desafía los modelos tradicionales de pesca e intenta desarrollar prácticas que incluyan interacciones ecológicas potenciales y determinantes en las fluctuaciones de las poblaciones de peces. En este caso, utilizando modelos simples de depredador-presa, reconstruimos la dinámica poblacional de la merluza y la langosta roja (Figura 5; Lima y cols., datos no publicados). Los resultados indican que el colapso y la recuperación de estas poblaciones están estrechamente relacionados con la sobrepesca y las interacciones tróficas. Además, exploramos diferentes estrategias que podrían haber evitado el colapso de la pesquería de merluza chilena mediante la aplicación de los mejores modelos elegidos en un contexto EBFM. El modelo ecológico utilizado en este estudio representa una contribución sustancial para el manejo de las pesquerías y para que se tenga en cuenta los forzantes del ecosistema, como está propuesto por el enfoque EBFM.

Aunque el manejo pesquero tradicional ignora el contexto ecosistémico (biológico y ambiental) en el que se insertan las poblaciones de peces, incluir a priori un número determinado de variables ecológicas o climáticas para construir modelos EBFM puede aumentar la complejidad del sistema innecesariamente. Utilizando el ejemplo antes mencionado, demostramos que al implementar un enfoque EBFM considerando los efectos de la pesca, la competencia intraespecífica y la abundancia de presas, el dramático colapso podría haberse evitado. Este es un resultado clave, porque el manejo actual de la pesca en Chile está basado en el enfoque de una especie o especie única, aun cuando la ley chilena de pesca incluye explícitamente (la necesidad de...) un

enfoque ecosistémico para gestionar los recursos pesqueros (Wiff y cols., 2016). Por lo tanto, la explotación sustentable de las poblaciones de peces depende de cómo podemos incluir las más importantes interacciones ambientales y del ecosistema en los modelos utilizados para así

determinar la tasa de captura de las pesquerías marinas. Las ideas y los modelos dinámicos de la población desarrollados por el equipo de Lima contribuyen a las futuras políticas y decisiones de gestión que producen pesquerías ecológica y económicamente sustentables.



**Figura 5.** Vista esquemática de la estructura trófica del Ecosistema Corriente de Humboldt en el centro de Chile. Las flechas azules representan interacciones inter-específicas entre las merluzas (centro), langostinos colorados (abajo) y las flotas pesqueras de merluza (arriba) chilena. Las flechas grises demuestran los efectos de la pesca y la competencia intra-específica en el langostino colorado. Los valores de los parámetros negativos y positivos indican los efectos sobre la biomasa de la especie.

El segundo caso de estudio analiza el colapso de las sociedades agrarias humanas. La evidencia histórica indica que los cambios climáticos a largo plazo han desestabilizado las civilizaciones y causado el colapso de las poblaciones a través de la escasez de alimentos, enfermedades y guerras. Uno de los peores colapsos poblacionales de las sociedades humanas ocurrió a principios del siglo XIV en el

norte de Europa; la "Gran Hambruna" fue la consecuencia de los efectos dramáticos del deterioro del clima sobre el crecimiento de la población humana. Por lo tanto, parte de nuestra motivación fue demostrar que los modelos de poblacionales simples pueden ser útiles para comprender las causas de los cambios poblacionales en las sociedades preindustriales. Nuestros resultados sugie-

ren que un modelo logístico con la temperatura como factor de perturbación es el elemento clave para explicar el colapso exhibido por la población europea durante el período de "Gran Hambruna" (1315-1350, Figura 6). Este ejemplo ilustra cómo se puede emplear la teoría ecológica general para comprender y explicar las causas de los colapsos

de la población humana en las sociedades preindustriales. Este es un ejemplo de teoría ecológica aplicada, en particular, -los usos de la ecuación logística, las teorías relativas a la dinámica de poblaciones no lineales y las perturbaciones exógenas -para enfrentar los cambios demográficos de las sociedades humanas.

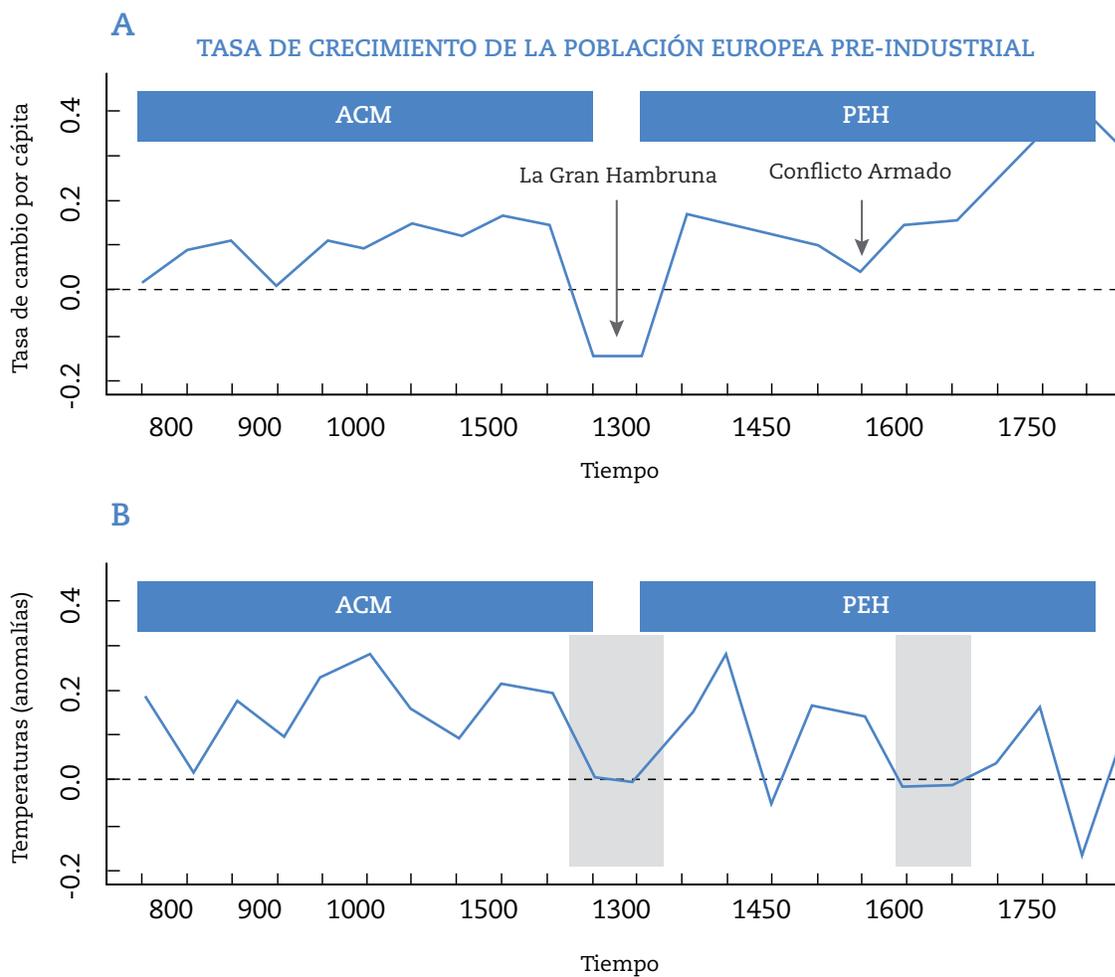


Figura 6. (A) Dinámica de la población humana en Europa preindustrial (800-1800 DC). Las flechas azules indican los periodos de colapso poblacional (gran hambruna) y de desaceleración del crecimiento (guerra de los 30 años), las barras azules horizontales representan el periodo de la Anomalia Cálida Medioeval (ACM) y la Pequeña Edad del Hielo (PEH). (B) Serie de tiempo reconstruida a partir de las anomalías de temperatura de junio-julio-agosto (con respecto al período 1901-2000) de valores promedios anuales de 50 años. Las franjas grises representan periodos de rápido enfriamiento del clima en Europa. Figura modificada de: Lima, M., 2014. Climate change and the population collapse during the "Great Famine" in pre-industrial Europe. *Ecology and Evolution*, 4(3):284-291.

Finalmente, un último caso de estudio aborda la dinámica de cultivos sustentables y el cambio climático. Se espera que el sur de Sudamérica juegue un papel cada vez más importante en la producción mundial de alimentos, pero el cambio climático podría amenazarlo seriamente. Hemos analizado datos históricos a largo plazo para cultivos principales (arroz, avena, cebada, girasol, soja, sorgo, trigo, maíz) a escala subnacional para: 1) buscar características comunes entre las dinámicas de rendimiento de los cultivos, evaluar su estructura y que implica la persistencia de ese cultivo; 2) abordar las complejas respuestas de los cultivos a los cambios en las condiciones ambientales de crecimiento; y 3) identificar puntos críticos de impacto climático que son cruciales para la adaptación y la mitigación. En este grupo de investigación se ha propuesto un enfoque metodológico novedoso basado en sistemas dinámicos, para comprender los procesos que hay detrás de las fluctuaciones anuales del rendimiento de los cultivos.

En este caso se analizan los resultados de los procesos de retroalimentación negativa internos

(mediante ajustes biofísicos) que regulan la producción de cultivos, y también como influyen en la persistencia de los cultivos y en los niveles máximos de rendimiento. Los hallazgos de esta investigación sugieren que las condiciones climáticas tienen un mayor impacto en el crecimiento a niveles de rendimiento altos (impactos no aditivos). Con esta información se permite que la gestión agrícola sea aplicada de manera más eficiente, evitando maximizar el rendimiento por hectárea lo que podría ser una estrategia para debilitar la relación que existe entre la productividad y el cambio climático. También se han identificado aquellos cultivos y regiones que son más vulnerables a las tendencias actuales del cambio climático en los agroecosistemas del sur de América del Sur. Estos resultados permiten señalar nuevas formas de mejorar el éxito autorregulado, maximizando la eficiencia de la producción de los cultivos y reduciendo los impactos climáticos. También se discuten importantes implicancias para el manejo de cultivos y la mitigación de los efectos del cambio climático en un área donde la agricultura juega un papel clave en sus dimensiones socioeconómicas y ecológicas.

### 5. GESTIÓN Y POLÍTICA DE RECURSOS NATURALES SOSTENIBLES

El futuro de la humanidad depende de la transición hacia la sustentabilidad, en escalas que van desde lo local a lo global (Gelcich y cols., 2010). El grupo de investigación liderado por **Stefan Gelcich** considera que la mejora de nuestro conocimiento sobre el manejo sustentable de los recursos naturales y las políticas asociadas es central para lograr el bienestar humano sostenido en el tiempo. Los principios clave de la sustentabilidad son las interconexiones entre los subsistemas humanos y ambientales. Por lo tanto, este tipo de investigación debe ser altamente interdisciplinaria, con el objetivo de comprender sistemas acoplados de ambiente-ser humano (es decir, socio ecológicos), con esfuerzos enfocados en la resolución de problemas, dirigidos a la sustentabilidad y la política de gestión de los recursos naturales.

El estudio de la gestión y la política de recursos naturales deben basarse en la investigación fundamentada sobre el usuario y la ubicación, como una forma de comprender y mejorar la relación dinámica entre los servicios de los ecosistemas y el bienestar humano. Existen al menos cuatro aspectos generales que son de crucial importancia para avanzar en la ciencia y la práctica del manejo de los recursos naturales, así como también para abordar los obstáculos clave para la sustentabilidad (Figura 7): 1) Creación de la Agenda; 2) Formulación de políticas que incluyan el análisis sistemático de nuevas soluciones científicas para problemas de gestión de recursos naturales; 3) Implementación de políticas que incluyan la evaluación de la capacidad institucional de los instrumentos de políticas de gestión de recursos naturales; y 4) Evaluación basada en la evidencia del impacto de las políticas existentes sobre múltiples servicios eco sistémicos.

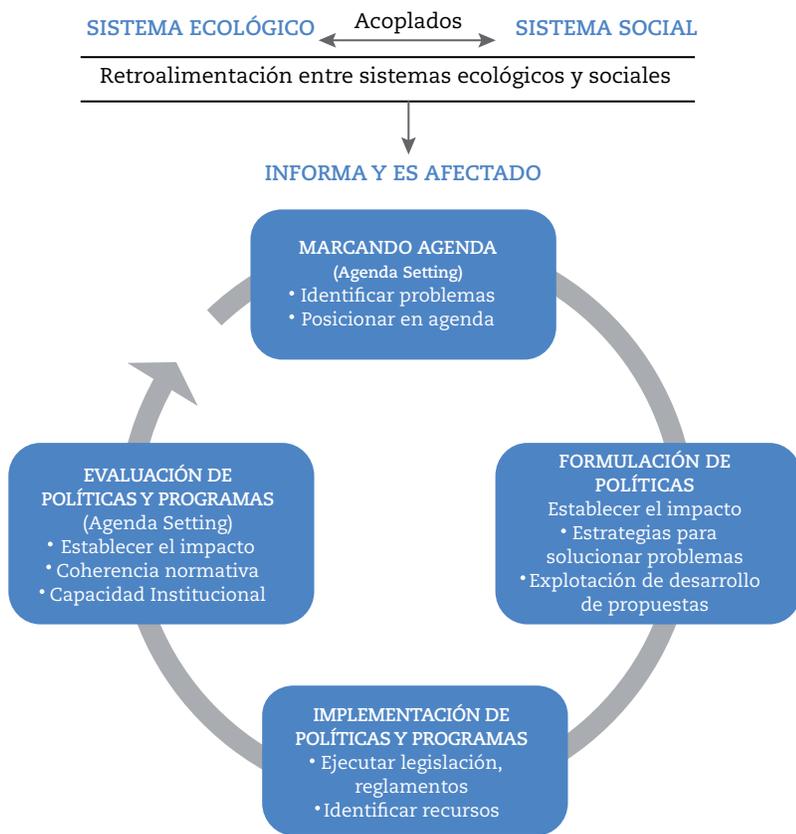


Figura 7. Entender sistemas social-ecológicos con énfasis en problemas sobre la gestión de recursos naturales.

De acuerdo con el enfoque interdisciplinario, los métodos de las diversas ciencias: sociales, económicas y políticas, deben integrarse a las herramientas ecológicas para avanzar en la sustentabilidad del manejo de los recursos naturales. Los enfoques experimentales también juegan un papel fundamental para evaluar los anteriores y actuales enfoques de manejo. Para ello deben realizarse a diferentes escalas y considerando las políticas nacionales existentes como experimentos naturales. El diseño de las nuevas estrategias de gestión debe ser conducido como experimentos locales, incluyendo juegos económicos experimentales, para así abordar las respuestas conductuales individuales y la internalización de normas (Gelcich y cols., 2013). Finalmente, con el fin de abordar los desafíos de manejo, la dinámica del entorno y su gobernanza deben considerarse conjuntamente con el fin de investigar los aspectos interactivos de los problemas. El grupo de investigación de Gelcich anticipa que los hallazgos de este tipo de investigación probablemente resulten en ganancias para la sustentabilidad y nuevas alianzas intersectoriales.

### **Casos de Estudio: Pesquerías Costeras Chilenas y Conservación de la Biodiversidad**

Al informar sobre las políticas y la sustentabilidad en el uso de los recursos naturales para así aumentar la competitividad de la economía chilena, es fundamental comprender los vínculos entre los sistemas ecológicos y sociales. En este estudio de caso el grupo de Gelcich analiza la pesca a pequeña escala en Chile y sus implicaciones para la gestión y la conservación de la biodiversidad. Chile se encuentra entre los 10 países más importantes en términos de desembarques de pesca (FAO, 2010). En los últimos 5 años, el total agregado de desembarques de especies silvestres, tanto por industriales como por artesanales, ha oscilado alrededor de 4.5 millones de toneladas/año (Castilla, 2010). Aproximadamente, el 50% de los desembarques marinos se basan en pesquerías artesanales que operan en zonas costeras (aproximadamente <10 millas mar adentro; Castilla, 2010). En Chile, para ser clasificados como "pescares artesanales" los buques no deben exceder los 18 m de longitud y tener un máximo de hasta 50 toneladas de registro bruto (Ley de Pesca y Acuicultura No. 18 892; Castilla 2010). Dentro de las zonas costeras, la flota artesa-

nal suministra una fracción significativa de peces de gran valor, peces pelágicos pequeños, invertebrados bentónicos y recursos de algas. Chile estableció una estrategia nacional sobre Política de Derechos Territoriales de Uso en la Pesca (del inglés TURF, traducido como DTUP) que otorgaba al gobierno la autoridad para asignar derechos de acceso exclusivos a organizaciones de pescadores artesanales para la recolección sustentable de recursos bentónicos (Castilla y cols. 1998; Figura 5 de Anexos). A partir de 2010, se decretaron más de 700 DTUP (> 1100 km<sup>2</sup>) para organizaciones de pescadores en toda la costa de Chile (Gelcich y cols., 2012). Esta gran red de DTUP coloca a Chile a la vanguardia del establecimiento de una política basada en los derechos para la gestión de los recursos marinos (Gelcich y cols., 2015).

Un área de estudio crítico es la comprensión de las condiciones que determinan el resultado de las políticas de gestión de los recursos naturales. La investigación multidisciplinaria permite evaluar múltiples factores que pueden permitir el éxito. Por ejemplo, el uso del análisis de redes sociales permite una comprensión crucial del capital social asociado al manejo de recursos naturales (Crona y cols., 2017). Las organizaciones de pescadores con mejor desempeño en el sistema DTUP en Chile son aquellas que tienen niveles más altos de vinculación y conexión con el capital social. Existen correlaciones positivas y fuertes entre la vinculación de los niveles de capital social y las variables de rendimiento de los DTUP. Es importante destacar que las organizaciones de pescadores que son consideradas exitosas en el manejo de los recursos, presentaron consistentemente altos niveles de vinculación de capital social, independientemente de la variabilidad en la unión del capital social. El uso de redes egocéntricas (Egocentric networks) permite comprender las diferencias de los actores en la estructura social de colaboración, proporcionando así conocimientos críticos para mejorar los sistemas de gestión (Marín y cols., 2012).

Es fundamental promover la discusión sobre conceptualización y la operatividad del capital social, fomentando un acercamiento del trabajo teórico y empírico sobre el rol que cumple dicho capital y el liderazgo en la administración de los recursos naturales (en particular la pesca), mediante el uso de la gestión de la pesca a pequeña escala.

Crona y cols. (2017) presentaron cuatro propuestas teóricamente informadas acerca de la relación entre las variables explicativas clave y los resultados de DTUP. Los resultados muestran que el capital social vinculante (estructura interna de los grupos de pescadores) puede no ser un predictor útil de éxito, mientras que la presencia de un liderazgo comprometido y acuerdos entre los miembros en torno a las sanciones parece estar más estrechamente relacionado con el rendimiento en todas las variables de resultados sociales y ecológicos. Un hallazgo clave es que el uso del capital social como un término amplio, y que abarca múltiples variables pro-sociales, puede no ser un camino fructífero para mejorar nuestra comprensión de los factores determinantes del éxito en la gestión de los recursos. En cambio, los resultados indican que el liderazgo interactúa con los aspectos específicos de lo que generalmente se conoce como capital social, afectando los resultados.

Comprender la capacidad de adaptación de los usuarios de los recursos naturales es fundamental en la gestión de la pesca en pequeña escala. Es importante avanzar en el desarrollo de ideas teóricas sobre la capacidad de adaptación. Por ejemplo, Rivera y cols., (2016) han demostrado cómo el tipo de acuerdos de cogestión pueden generar efectivamente una capacidad de adaptación específica que ha demostrado ser exitosa para resistir choques económicos y ambientales combinados. Gelcich (2014) y Reyes y cols.(2017) han propuesto formas de mejorar los requisitos institucionales para

promover la capacidad de adaptación y generar un cambio hacia la gestión basada en los ecosistemas en el manejo de las pesquerías costeras, proponiendo recomendaciones en políticas públicas concretas, que adopten policentricidad en la gobernanza dentro de las pesquerías chilenas y ley de acuicultura. Este tipo de investigación ha dado como resultado colaboraciones estrechas con la Subsecretaría de Pesca, lo que ha dado lugar a una plataforma importante para las discusiones internas con dicha entidad.

Un aspecto clave que debe desarrollarse para la comprensión de la política de gestión de los recursos naturales, son los Informes de Política Pública. Tales informes han tomado forma en el "Informe anual: Votaciones ambientales en el Congreso". Este documento identifica el trabajo ambiental realizado por el Congreso durante el período legislativo chileno e incluye un análisis del efecto ambiental esperado de las leyes y la valoración de los votos de cada parlamentario. Los informes también pueden reportar los desarrollos históricos de los enfoques de gestión específicos, como la gestión basada en los ecosistemas, en términos de cómo se establecen en las agendas políticas y cómo va detrás la respuesta política (Gelcich y cols., datos no publicados). Este tipo de informes, además de poner el tema en la agenda y dar respuestas a las políticas medioambientales, pueden generar clasificaciones ambientales y perfiles parlamentarios, los que brindan información única al público.



## CONCLUSIONES

En este documento evaluamos el rol de las teorías biológicas, ecológicas y sociales en el avance de la sustentabilidad en Chile mediante la selección de algunos programas de investigación específicos (dentro de muchos otros) y casos de estudio específicos (entre muchos otros disponibles) como ejemplos.

El cambio global es una de las mayores amenazas para la biodiversidad. De hecho, algunos investigadores han sugerido que los efectos de las extinciones inducidas por el ser humano son tan grandes como las extinciones previas no inducidas por humanos en la historia de la Tierra. Los impulsores del cambio global son principalmente el cambio climático, la contaminación, la sobreexplotación de especies, la pérdida de hábitats y la invasión de especies exóticas. Todos estos impulsores fueron analizados aquí con ejemplos de casos de estudio en Chile. De hecho, demostramos que es probable que el impacto del cambio global opere en todos los niveles de la organización biológica; desde el genoma, las funciones bioquímicas y fisiológicas, a las poblaciones y comunidades y al mantenimiento de los servicios de los ecosistemas y la biodiversidad, incluido el sistema social.

Propusimos que el tipo de programa de investigación multiescala aquí analizado es urgente y necesario porque afectará positivamente a muchos aspectos de la economía chilena, a saber, la agricultura, la minería, la silvicultura, la pesca, la salud y la biodiversidad. El conocimiento generado por los científicos tiene como objetivo satisfacer las demandas de los sectores antes mencionados y así ayudar a cerrar la brecha reconocida entre ciencia y política. Los factores clave que permitirán que una estrategia científica tenga éxito consisten en poseer científicos de alto nivel con experiencia de largo plazo y en una sólida base en investigación básica y aplicada, así como en la capacitación de capital humano. Se hace necesario también un plan centrado en identificar las solicitudes de la industria y las agencias reguladoras para alinear la investigación científica en esa dirección. Chile debe

apuntar a una sociedad del conocimiento donde las materias primas tengan valor agregado, pero sin descuidar los sistemas ecológicos que es el sustrato sobre el cual se construye el desarrollo. En efecto, la investigación científica interdisciplinaria es la forma de generar nuevos enfoques, metodologías y prácticas que se traducirán en recomendaciones en las políticas que consideran una amplia gama de disciplinas. Además, la investigación interdisciplinaria debe formar científicos doctorales y postdoctorales con sólidas bases en ciencias básicas (biología, química, matemáticas y física), gestión de recursos naturales, incluida la teoría de sistemas socioecológicos, remediación y restauración de ecosistemas degradados, valoración económica de servicios ecosistémicos, economía experimental y análisis institucional.

En la era actual de ecosistemas dominados por los seres humanos y una biosfera moldeada por las acciones humanas desde escalas locales a globales, tales perspectivas están ganando terreno rápidamente en la ciencia a nivel mundial, se les da una gran prioridad entre las organizaciones de financiamiento, y están en demanda de la interfaz ciencia-política-práctica. Sin embargo, a pesar de las demandas urgentes indicadas, Chile continúa con la ausencia de una política científica, que es esencial para el desarrollo del país y del bienestar ciudadano. Desde nuestra perspectiva, un programa de investigación integrador, como el que se ejemplifica en este artículo debería ser una de las prioridades de un país que desea ingresar a una sociedad del conocimiento con crecimiento económico, social y cultural. De hecho, toda la evidencia indica que este tipo de programa de investigación integrador -que abarca desde la microbiología hasta el sistema social humano- es la única herramienta para generar y transferir conocimiento original que no está disponible en el mercado internacional, sino que debe ser autogenerado en el país, principalmente cuando trata con sistemas naturales locales, problemas locales y especies endémicas que solo se presentan en Chile y no son repetibles en otras partes del mundo.

En nuestra visión, la ciencia y sus derivados directos (por ejemplo, formación avanzada de capital humano, tecnología e innovación) deben ser considerada por el Estado chileno como una inversión estratégica y como un instrumento dinámico que sirve no sólo para combatir la ignorancia y la pobreza, sino también para dar valor económico agregado a la producción primaria elemental. Las

decisiones técnicas posteriores sobre áreas prioritarias de inversión en ciencia deberían organizarse en una segunda etapa en relación a los problemas emergentes, que pueden variar de acuerdo con las prioridades nacionales y los polos de desarrollo, pero sin abandonar la inversión en ciencia fundamental y holística que representa la base de la pirámide del desarrollo de los países.

---



ANEXOS

---



*Figura 1.* Formaciones vegetales del valle de Puchuncaví, Chile central, cerca de la fundición de cobre con severa reducción de la abundancia y cobertura de especies vegetales y erosión física del suelo (izquierda) y formación vegetal en áreas no impactadas (derecha).



*Figura 2.* Pilotaje de pequeña escala de fitoestabilización asistida en suelos degradados química y físicamente del valle de Puchuncaví luego de seis meses desde el establecimiento (foto cortesía de A. Neaman).



Figura 3. Tranque de relaves post-operativo mostrando erosión eólica de los relaves (izquierda) y después de seis años del establecimiento de un pilotaje de pequeña escala de fitoestabilización asistida (derecha).



Figura 4. La fisiología ecológica básica se utiliza para probar el efecto del calentamiento global sobre la tolerancia térmica y el rendimiento locomotor en la rana africana invasora *Xenopus laevis* (izquierda) y la rana chilena nativa *Calyptocephalella gayi* (derecha). Foto *X. laevis*: @Brian Gratwicke; <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>. Foto *C. gayi*: @José Grau; <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>



Figura 5. Galeta pesquera artesanal en Chile



**Figura 6. Investigadores principales CAPES-UC.** **L0:** Línea de dirección; **L1** (Línea 1, IP: Rosanna Ginocchio): Enriquecimiento del medio ambiente por metales: desde efectos a soluciones; **L2** (Línea 2, IP: Bernardo González): Procesos microbianos y protección del medio ambiente subyacente; **L3** (Línea 3, IP: Francisco Bozinovic): Fisiología Ambiental; **L4** (Línea 4, IP: Mauricio Lima): Teoría de Poblaciones para predecir la dinámica de los sistemas socio-ecológicos; **L5** (Línea 5, IP: Stefan Gelcich): Gestión sostenible de recursos naturales y política.





## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alloway, B.J. (2013) Heavy Metals in Soils.
- Aquea, F., Timmermann, T. & Herrera-Vásquez, A. (2017) Chemical inhibition of the histone acetyltransferase activity in *Arabidopsis thaliana*. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 483.
- Araneda, A., Grube, A., Gómez, I., Pavissich, J.P. & González, B. PCR sequences targeting key petroleum compounds degrading oxygenase genes to assess bioremediation potential in soils. In preparation.
- Berryman, A. (1991) Can economic forces cause ecological chaos? The case of the Northern Dungeness crab fishery. *Oikos* 62, 106-109.
- Berryman, A. & Lima, M. (2006) Deciphering the Effects of Climate on Animal Populations: Diagnostic Analysis Provides New Interpretation of Soay Sheep Dynamics. *The American Naturalist*, 168, 784–795.
- Beyer, J., Petersen, K., Song, Y., Ruus, A., Grung, M., Bakke, T., y cols. (2014) Environmental risk assessment of combined effects in aquatic ecotoxicology: A discussion paper. *Marine Environmental Research*, 96, 81–91.
- Boher, F., Trefault, N., Estay, S.A. & Bozinovic, F. (2016) Ectotherms in variable thermal landscapes: A physiological evaluation of the invasive potential of fruit flies species. *Frontiers in Physiology*, 7.
- Bozinovic, F., Medina, N.R., Alruiz, J.M., Cavieres, G. & Sabat, P. (2016a) Thermal tolerance and survival responses to scenarios of experimental climatic change: changing thermal variability reduces the heat and cold tolerance in a fly. *Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, 186, 581–587.
- Bozinovic, F., Sabat, P., Rezende, E.L. & Canals, M. (2016b) Temperature variability and thermal performance in ectotherms: Acclimation, behaviour, and experimental considerations. *Evolutionary Ecology Research*, 17, 111–124.
- Butler, C.D. (2000) Entrapment: Global Ecological and/or Local Demographic? Reflections Upon Reading the BMJ's Six Billion Day Special Issue. *Ecosystem Health*, 6, 171–180.
- Butler, C.D. (2004) Human carrying capacity and human health. *PLoS Medicine*, 1, 192–194.
- Cárcamo, V., Bustamante, E., Trangolao, E., de la Fuente, L.M., Mench, M., Neaman, A., y cols. (2012) Simultaneous immobilization of metals and arsenic in acidic polluted soils near a copper smelter in central Chile. *Environmental Science and Pollution Research*, 19, 1131–1143.
- Casale, J.F., Ginocchio, R. & León-Lobos, P. (2011) Guía 4: Marco ambiental y relaves mineros abandonados. Fitoestabilización de depósitos de relaves en Chile (ed Centro de Investigación Minera y Metalúrgica e Instituto de Investigaciones Agropecuarias), p. Andros Impresores.
- Castilla, J.C. (2010) Fisheries in Chile: small pelagics, management, rights, and sea zoning. *Bulletin of Marine Science*, 86, 221– 234.
- Castilla, J.C., Manríquez, P.H., Alvarado, J., Rosson, A., Pino, C., Espoz, C., y cols. (1998) Artisanal Caletas as units of production and co-managers of benthic invertebrates in Chile. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* pp. 407–413.
- Clavero-León, C., Ruiz, D., Cillero, J., Orlando, J. & González, B. New traits of the multi-metal resistance bacteria *Cupriavidus metallidurans* CH34 in plant-bacteria interaction with copper stressed *Arabidopsis thaliana*. In preparation.

- Cooke, S.J., Sack, L., Franklin, C.E., Farrell, A.P., Beardall, J., Wikelski, M., y cols. (2013) What is conservation physiology? Perspectives on an increasingly integrated and essential science. *Conservation Physiology*, 1, 1-23
- Córdova, S., Neaman, A., González, I., Ginocchio, R. & Fine, P. (2011) The effect of lime and compost amendments on the potential for the revegetation of metal- polluted, acidic soils. *Geoderma*, 166, 135– 144.
- Cortes, P.A., Puschel, H., Acuña, P., Bartheld, J.L. & Bozinovic, F. (2016) Thermal ecological physiology of native and invasive frog species: do invaders perform better? *Conservation Physiology*, 4, cow056.
- Crona, B., Gelcich, S. & Bodin, Ö. (2017) The Importance of Interplay Between Leadership and Social Capital in Shaping Outcomes of Rights-Based Fisheries Governance. *World Development*, 91, 70–83.
- Cumming, G.S. & Peterson, G.D. (2017) Unifying Research on Social–Ecological Resilience and Collapse. *Trends in Ecology and Evolution*, 32, 695–713.
- Denny, M. & Helmuth, B. (2009) Confronting the physiological bottleneck: A challenge from ecomechanics. *Integrative and Comparative Biology*, 49, 197–201.
- Díaz, S., Demissew, S., Carabias, J., Joly, C., Lonsdale, M., Ash, N., y cols. (2015) The IPBES Conceptual Framework - connecting nature and people. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 1–16.
- Donoso, R., Leiva-Novoa, P., Zúñiga, A., Timmermann, T., Recabarren-Gajardo, G. & González, B. (2017) Biochemical and genetic bases of indole-3-acetic acid (auxin phytohormone) degradation by the plantgrowth- promoting rhizobacterium *Paraburkholderia phytofirmans* PsJN. *Applied and Environmental Microbiology*, 83.
- Dvořák, P., Nikel, P.I., Damborský, J. & de Lorenzo, V. (2017) Bioremediation 3.0: Engineering pollutant-removing bacteria in the times of systemic biology. *Biotechnology Advances*, 35, 845–866.
- España, H, J., Quinteros, J., Ginocchio, R., Bas, F., Arias, R. & Gandarillas, M. (2016) Efecto de la enmienda orgánica con lodos de cerdo sobre el establecimiento de *Lolium perenne* en relaves mineros. *AgroSur*, 44, 41–52.
- Ettler, V. (2016) Soil contamination near non-ferrous metal smelters: A review. *Applied Geochemistry*, 64, 56–74.
- FAO. (2010) *El Estado Mundial de La Pesca Y La Acuicultura - 2010*. Roma.
- De la Fuente, L.M., Ovalle, J.F., Arellano, E. C. & Ginocchio, R. (2017a) Does woody species with contrasting root architecture require different container size in nursery? *Madera y Bosques*. Accepted.
- De La Fuente, L.M., Ovalle, J.F., Arellano, E.C. & Ginocchio, R. (2017b) Use of alternative containers for promoting deep rooting of native forest species used for dryland restoration: The case of *Acacia caven*. *IForest*, 10, 776–782.
- Gacitúa, C., Morgante, V., Poupin, M.J., Ledger, T., Rodríguez-Valdecantos, G., Rojas, C., y cols. Cooperative effects of a spontaneous early-plant colonizar and its microbial community allows establishment in abandoned copper mine tailings. In preparation.
- Galor, O. & Weil, D.N. (2000) Population, technology, and growth: From malthusian stagnation to the demographic transition and beyond. *American Economic Review*, 90, 806–828.
- Gandarillas, M., España, H., Gardeweg, R., Bas, F., Arellano, E.C., Brown, S., y cols. Integrated Management of Pig Residues and Copper Mine Wastes for Aided Phytostabilization: Evaluation of Odor Emission Control and Efficacy as Organic Amendments at Laboratory Scale. In preparation.
- Gelcich, S. (2014) Towards polycentric governance of small-scale fisheries: insights from the new “Management Plans” policy in Chile. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 24, 575–581.

- Gelcich, S., Fernández, M., Godoy, N., Canepa, A., Prado, L. & Castilla, J.C. (2012) Territorial User Rights for Fisheries as Ancillary Instruments for Marine Coastal Conservation in Chile. *Conservation Biology*, 26, 1005–1015.
- Gelcich, S., Guzman, R., Rodríguez-Sickert, C., Castilla, J.C. & Cárdenas, J.C. (2013) Exploring external validity of common pool resource experiments: Insights from artisanal benthic fisheries in Chile. *Ecology and Society*, 18.
- Gelcich, S., Hughes, T.P., Olsson, P., Folke, C., Defeo, O., Fernandez, M., y cols. (2010) Navigating transformations in governance of Chilean marine coastal resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, 16794–16799.
- Gelcich, S., Peralta, L., Donlan, C.J., Godoy, N., Ortiz, V., Tapia-Lewin, S., y cols. (2015) Alternative strategies for scaling up marine coastal biodiversity conservation in Chile. *Maritime Studies*, 14.
- Ginocchio, R. (2000) Effects of a copper smelter on a grassland community in the Puchuncaví Valley, Chile. *Chemosphere*, 41, 15–23.
- Ginocchio, R., Arellano, E., Gandarillas, M., Sáez-Navarrete, C., van Ham, M. & Brown, S. (2016) Mixing residues allows multiple benefits beyond proper stabilization of tailings storage facilities at closure. *First International Congress on Planning for Closure of Mining Operations* pp. 1–11. Santiago.
- Ginocchio, R., Cárcamo, V., Bustamante, E., Trangelao, E., de la Fuente, L.M. & Neaman, A. (2013) Efficacy of fresh and air-dried biosolids as amendments for remediation of acidic and metal-polluted soils: A short-term laboratory assay. *Journal of soil science and plant nutrition*, 13, 855–869.
- Ginocchio, R., Carvallo, G., Toro, I., Bustamante, E., Silva, Y. & Sepúlveda, N. (2004) Micro-spatial variation of soil metal pollution and plant recruitment near a copper smelter in Central Chile. *Environmental Pollution*, 127, 343–352.
- Ginocchio, R. & León-Lobos, P. (2011) Guía 1: Metodología general. Fitoestabilización de depósitos de relaves en Chile (ed C. de I.M. y M. e I. de I. Agropecuarias), p. Andros Impresores, Santiago.
- Ginocchio, R., León-Lobos, P., Arellano, E.C., Anic, V., Ovalle, J.F. & Baker, A.J.M. (2017) Soil physico-chemical factors as environmental filters for spontaneous plant colonization of abandoned tailing dumps. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 13484–13496.
- Ginocchio, R., Sánchez, P., De La Fuente, L.M., Camus, I., Bustamante, E., Silva, Y., y cols. (2006) Agricultural soils spiked with copper mine wastes and copper concentrate: Implications for copper bioavailability and bioaccumulation. *Environmental Toxicology and Chemistry* pp. 712–718.
- Hou, D., O'Connor, D., Nathanail, P., Tian, L. & Ma, Y. (2017) Integrated GIS and multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination: A critical review. *Environmental Pollution*, 231, 1188–1200.
- Kates, R.W., Clark, W.C., Corell, R., Hall, J.M., Jaeger, C.C., Lowe, I., y cols. (2001) Sustainability science. *Science*, 292, 641–642.
- Ledger, T., Rojas, S., Timmermann, T., Pinedo, I., Poupin, M.J., Garrido, T., y cols. (2016) Volatile-mediated effects predominate in *Paraburkholderia phytofirmans* growth promotion and salt stress tolerance of *Arabidopsis thaliana*. *Frontiers in Microbiology*, 7.
- Li, Z., Ma, Z., van der Kuijp, T.J., Yuan, Z. & Huang, L. (2014) A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment. *Science of the Total Environment*, 468–469, 843–853.
- Marín, A., Gelcich, S., Castilla, J.C. & Berkes, F. (2012) Exploring social capital in Chile's coastal benthic Comanagement system using a network approach. *Ecology and Society*, 17.
- Menares, F., Carrasco, M.A., González, B., Fuentes, I. & Casanova, M. (2017) Phytostabilization Ability of *Baccharis linearis* and Its Relation to Properties of a Tailings-Derived Technosol. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228, 182.

- Mench, M.J., Manceau, A., Vangronsveld, J., Clijsters, H. & Mocquot, B. (2000) Capacity of soil amendments in lowering the phytoavailability of sludge-borne zinc. *Agronomie*, 20, 383–397.
- Motesharrei, S., Rivas, J. & Kalnay, E. (2014) Human and nature dynamics (HANDY): Modeling inequality and use of resources in the collapse or sustainability of societies. *Ecological Economics*, 101, 90–102.
- Naser, H.A. (2013) Assessment and management of heavy metal pollution in the marine environment of the Arabian Gulf: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 72, 6–13.
- Neaman, A., Reyes, L., Trolard, F., Bourrié, G. & Sauvé, S. (2009) Copper mobility in contaminated soils of the Puchuncaví valley, central Chile. *Geoderma*, 150, 359–366.
- Ovalle, J.F., Arellano, E.C. & Ginocchio, R. (2015) Trade-offs between drought survival and rooting strategy of two South American Mediterranean tree species: Implications for dryland forests restoration. *Forests*, 6, 3733–3747.
- Ovalle, J.F., Arellano, E.C., Ginocchio, R. & Becerra, P. (2016) Fertilizer location modifies root zone salinity, root morphology, and water-stress resistance of tree seedlings according to the watering regime in a dryland reforestation. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*.
- Pascual, U., Balvanera, P., Díaz, S., Pataki, G., Roth, E., Stenseke, M., y cols. (2017) Valuing nature's contributions to people: the IPBES approach. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 26–27, 7–16.
- Peters, R. (1991) *A Critique for Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Pinedo, I., Ledger, T., Greve, M. & Poupin, M.J. (2015) Burkholderia phytofirmans PsJN induces long-term metabolic and transcriptional changes involved in Arabidopsis thaliana salt tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 6.
- Poupin, M.J., Greve, M., Carmona, V. & Pinedo, I. (2016) A Complex Molecular Interplay of Auxin and Ethylene Signaling Pathways Is Involved in Arabidopsis Growth Promotion by Burkholderia phytofirmans PsJN. *Frontiers in Plant Science*, 7.
- Rahmstorf, S. & Coumou, D. (2011) Increase of extreme events in a warming world. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 17905–17909.
- Reyes, F., Gelcich, S. & Ríos, M. (2017) Problemas globales, respuestas locales: planes de manejo como articuladores de un sistema de gobernabilidad policéntrica de los recursos pesqueros. "Propuestas para Chile" Concurso Políticas Públicas 2016 (ed P.U.C. de Chile), p. Santiago.
- Rivera, A., Gelcich, S., García-Flórez, L. & Acuña, J.L. (2016) Assessing the sustainability and adaptive capacity of the gooseneck barnacle co-management system in Asturias, N. Spain. *Ambio*, 45(2), 230–40.
- Santibañez, C., Ginocchio, R. & Brown, S. (2011) Guía 2: Aplicación sustentable de acondicionadores. Fitoestabilización de depósitos de relaves en Chile. (ed C. de I.M. y M. e I. de I. Agropecuarias), p. Andros Impresores.
- Santibañez, C., De La Fuente, L.M., Bustamante, E., Silva, S., León-Lobos, P. & Ginocchio, R. (2012) Potential use of organic- and hard-rock mine wastes on aided phytostabilization of large-scale mine tailings under semiarid mediterranean climatic conditions: Short-Term field study. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., y cols. (2007) IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.
- De Souza Machado, A.A., Spencer, K., Kloas, W., Toffolon, M. & Zarfl, C. (2016) Metal fate and effects in estuaries: A review and conceptual model for better understanding of toxicity. *Science of the Total Environment*, 541, 268– 281.
- Timmermann, T., Armijo, G., Donoso, R., Seguel, A., Holuigue, L. & González, B. (2017) Par burkholderia phytofirmans PsJN Protects Arabidopsis thaliana Against a Virulent Strain of Pseudomonas syringae Through the Activation of Induced Resistance. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 30, 215–230.

- Timmis, K., de Lorenzo, V., Verstraete, W., Ramos, J.L., Danchin, A., Brüssow, H., y cols. (2017) The contribution of microbial biotechnology to economic growth and employment creation. *Microbial Biotechnology*, 10, 1137–1144.
- Vázquez, D.P., Gianoli, E., Morris, W.F. & Bozinovic, F. (2017) Ecological and evolutionary impacts of changing climatic variability. *Biological Reviews*, 92, 22–42. Verdejo, J., Ginocchio, R., Sauvé, S., Salgado, E. & Neaman, A. (2015) Thresholds of copper phytotoxicity in field-collected agricultural soils exposed to copper mining activities in Chile. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 122, 171–177.
- Verdugo, C., Sánchez, P., Santibáñez, C., Urrestarazu, P., Bustamante, E., Silva, Y., y cols. (2011) Efficacy of Lime, Biosolids, and Mycorrhiza for the Phytostabilization of Sulfidic Copper Tailings in Chile: A Greenhouse Experiment. *International Journal of Phytoremediation*, 13, 107–125.
- Verstraete, W. & De Vrieze, J. (2017) Microbial technology with major potentials for the urgent environmental needs of the next decades. *Microbial Biotechnology*, 10, 988–994.
- Wackett, L.P. (2017) Microbial enhancement of plant growth: An annotated selection of World Wide Web sites relevant to the topics in environmental microbiology. *ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, 19, 3784–3785.
- Wiff, R., Quiroz, J.C., Neira, S., Gacitua, S. & Barrientos, M.A. (2016) Chilean fishing law, maximum sustainable yield, and the stock recruitment relationship. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44, 380–391.
- Wikelski, M. & Cooke, S.J. (2006) Conservation physiology. *Trends in Ecology and Evolution*, 21, 38–46.
- Zúñiga, A., de la Fuente, F., Federici, F., de Lorenzo, V. & González, B. (2017) Engineering artificial beneficial plant-bacteria interaction using a synthetic quorum sensing network. *ACS Synthetic Biology* - Submitted.

# EL ROL DE LA TEORÍA ECOLÓGICA EN EL AVANCE DE LA SUSTENTABILIDAD EN CHILE

## **AUTORES**

Francisco Bozinovic<sup>1,2</sup>  
Stefan Gelcich<sup>1,2</sup>  
Rosanna Ginocchio<sup>1,3</sup>  
Bernardo González<sup>1,4</sup>  
Fabian M. Jaksic<sup>1,2</sup>  
Mauricio Lima<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Center of Applied Ecology & Sustainability (CAPES), Santiago, Chile

<sup>2</sup> Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

<sup>3</sup> Departamento de Ecosistemas y Medio Ambiente, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

<sup>4</sup> Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibáñez, Santiago, Chile

## **EDICIONES**

Centro de Ecología Aplicada y Sustentabilidad (CAPES-UC)  
Avda. Libertador Bernardo O'Higgins 340, Santiago, Chile.  
[www.capes.cl](http://www.capes.cl)

## **DERECHOS RESERVADOS**

Mayo 2018  
Primera edición 300 ejemplares  
Diseño y corrección: Daniella Mella-Flores  
Diagramación: Maricel Inostroza

## **PATROCINIO**

CONICYT-PIA (FB 0002-2014)

## **PROPÓSITO Y PERMISOS**

Este libro ha sido generado con propósitos de distribución gratuita y su versión digital puede ser descargada desde [www.capes.cl](http://www.capes.cl). o puede ser solicitada vía email ([valeriaoppliger@gmail.com](mailto:valeriaoppliger@gmail.com)).

## **COMO CITAR ESTE LIBRO**

Bozinovic, F., Gelcich, S., Ginocchio, R., González, B., Jaksic, F.M. & M. Lima (2018). El rol de la teoría ecológica en el avance de la sustentabilidad en Chile. Santiago, Chile, Ediciones CAPES-UC.

[www.capes.cl](http://www.capes.cl)

