ANALES

ISSN 0365-1185



Tomo 72

BUENOS AIRES - 2021

ANALES de la ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS y NATURALES

TOMO 72

BUENOS AIRES 2021

Comisión de Biblioteca, Publicaciones y WEB Presidente: Dr. Demetrio Boltovskoy Miembro: Ing. Carlos H. Muravchik

Lugar y fecha de edición Buenos Aires, Argentina, abril 2021

Esta publicación es propiedad de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Toda la correspondencia referente a esta publicación debe dirigirse a: *All enquires regarding this publication shold be addressed to:*

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Avda. Alvear 1711, 4° piso 1014 Buenos Aires Argentina

Tel.: (54-11) 4811-2998/(54-11) 4815-9451

Fax: (54-1) 4811-6951

E-mail Secretaría: acad@ancefn.org.ar E-mail Biblioteca: biblio@ancefn.org.ar Sitio web: www.ancefn.org.ar

CONTENIDO

Contenido	3
Estructura y actividades de la Academia	5
Autoridades y Miembros	6
Mesa Directiva	6
Secciones	6
Comisiones	7
Académicos Titulares	8
Académicos Eméritos	9
Académicos Honorarios	9
Académicos Correspondientes Nacionales	9
Académicos Correspondientes en el Exterior	10
Sesiones Ordinarias	13
Divulgación Científica	14
Publicaciones	15
Participación en Reuniones y Comunicación Institucional .	16
Instituto de Botánica Darwinion	17
Incorporaciones de Académicos	18
Dra. Carolina S. Vera	19
Dra. Graciela Boente	21
Dr. Sebastián Uchitel	23
Dr. Pablo Ferrari	26
Dr. Miguel Angelo Stipp Basei	28
Dr. Miguel A. Blesa	32
Dr. Oscar Bruno	37
Homenajes	39
Ing. Eduardo Núñez	40
Dr. Mario Bunge	44
Dr. Antonio Blanco	47
Reconocimientos	48
Doctorado Honoris Causa a la Dra. Alicia Dickenstein	49
Premios ANCEFN	50

Apertura del acto de entrega de premios
Premios Consagración
Premio en Innovación Tecnológica55
Premios Estímulo
Presentaciones de los premiados
Becas
Comunicaciones científicas
Hiperacumulación de metales por plantas (E. J. Baran)76
Lothar Meyer: el otro descubridor del sistema periódico de los
elementos químicos (E. J. Baran)114
América del Sur y África en la formación del Gondwana occidental
(M. A. S. Basei)
La movilización de los óxidos de hierro y de cromo: una mezcolanza
de química, biología y geología (M. A. Blesa)
Inferencia robusta: un trayecto de lo finito a lo infinito-dimensional
(G. Boente)
Invasion biology: evidence, assumptions, and conservationism
(N. M. Correa, R. C. Guiaşu, D. Boltovskoy)
Instrucciones para autores

ESTRUCTURA y ACTIVIDADES DE LA ACADEMIA

Señores Académicos:

En el presente año, especialmente excepcional por la pandemia de SARS -COVID 19, que nos mantuvo a todos aislados en nuestras casas, las actividades, debieron adoptar un formato virtual, y el funcionamiento de la Academia fue remoto. Por tanto, todas sus actividades se vieron afectadas, pero han podido ser cumplimentadas en una nueva modalidad.

El texto completo de la Memoria Anual 2020 puede ser consultado en el sitio web de la ANCEFN (https://www.ancefn.org.ar/).

Víctor A. Ramos Presidente Buenos Aires, abril de 2021

AUTORIDADES y MIEMBROS

MESA DIRECTIVA (2020-2022)

Presidente: Dr. Víctor A. Ramos **Vicepresidente**: Dra. Gloria Dubner

Secretario General: Ing. Miguel Laborde

Secretario de Actas: Dr. Ricardo Sánchez Peña

Tesorera: Dra. Teresa Pérez

Protesorera: Dra. Alicia Dickenstein

Suplente: Dr. Galo Soler Illia

Suplente: Dr. Demetrio Boltovskoy

Presidente saliente: Dr. Roberto Williams

SECCIONES

Sección de Matemática, Física y Astronomía

Presidente: Dra. Gloria Dubner **Secretario**: Dr. Jorge E. Solomín

Miembros:

Dra. Graciela Boente

Dra. Alicia Dickenstein

Dra. Gloria Dubner

Dr. Ricardo Durán

Dr. Huner Fanchiotti

Dr. Pablo Ferrari

Dra. Cristina Mandrini

Dr. Mario A.J. Mariscotti

Dr. Félix Mirabel

Dr. Jorge Solomin

Dr. Victor Yohai

Sección de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología

Presidente: Dr. Ing. Raul Lopardo **Secretario**: Dra. Teresa Pérez

Miembros:

Dr. Alfredo Calvelo

Dr. Eduardo N. Dvorkin

Ing. Luis de Vedia

Dr. Miguel Angel Laborde

Dr. Ing. Raúl A. Lopardo

Ing. Carlos H. Muravchik

Dra. Teresa Pérez

Dra. Marta Rosen

Dr. Ricardo Sánchez Peña

Dr. Sebastián Uchitel

Dr. Roberto Williams

Dra. Noemí Zaritzky

Sección de Ciencias Químicas, de la Tierra y Biológicas

Presidente: Dra. Norma Sbarbati Nudelman

Secretario: Dr. Galo Juan de Ávila Arturo Soler Illia

Miembros:

Dr. Miguel A. Blesa

Dr. Demetrio Boltovskoy

Dra. Zulma B. de Gasparini

Dr. Alberto Kornblihtt

Dra. Norma Sbarbati Nudelman

Dr. Armando J. Parodi

Dr. Víctor Ramos

Dr. Carlos W. Rapela

Dr. Galo Juan de Ávila Arturo Soler Illia

Dra. Carolina Vera Dr. Fernando Zuloaga

COMISIONES

Comisión de Becas y Premios

Presidente: Dr. Armando J. Parodi

Miembros: Dr. Alfredo Calvelo y Dr. Huner Fanchiotti

Comisión de Biblioteca, Publicaciones y Web

Presidente: Dr. Demetrio Boltovskoy **Miembro**: Ing. Carlos H. Muravchik

Comisión de Supervisión del Instituto de Botánica Darwinion

Presidente: Dr. Armando J. Parodi **Miembro**: Dr. Demetrio Boltovskoy

Comisión de Interpretación y Reglamento

Presidente: Dr. Roberto Williams

Miembros: Dr. Carlos Rapela y Dra. Cristina Mandrini

Comisión de Educación en Ciencias

Presidente: Dra. Norma Sbarbati Nudelman

Miembros: Ing. Luis de Vedia, Dra. Alicia Dickenstein y Dr. Victor Yohai

Comisión para la ciudad de La Plata

Miembros: Dra. Zulma Brandoni y Dra. Noemi Zaritsky

ACADÉMICOS TITULARES y fechas de nombramiento

Dr. Miguel Angel Blesa	28-08-2020
Dra. Graciela Boente	24-04-2019
Dra. Zulma Brandoni de Gasparini	29-06-2012
Dr. Demetrio Boltovskoy	29-06-2018
Dr. Alfredo Calvelo	01-06-2007
Ing. Luis A. de Vedia	29-05-2009
Dra. Alicia Dickenstein	27-07-2018
Dra. Gloria Dubner	29-09-2018
Dr. Ricardo Durán	31-08-2007
Dr. Ing. Eduardo N. Dvorkin	31-05-1996
Dr. Huner Fanchiotti	28-06-1991
Dr. Pablo Ferrari	30-07-2019
Dr. Alberto R. Kornblihtt	25-04-2014
Dr. Miguel Angel Laborde	25-10-2013
Dr. Ing. Raúl A. Lopardo	24-11-1995
Dra. Cristina Mandrini	23-03-2018
Dr. Mario A. J. Mariscotti	25-04-1986
Dr. Félix Mirabel	25-04-2014
Ing. Carlos H. Muravchik	28-04-2017
Dra. Norma Sbarbati Nudelman	25-06-2004
Dr. Armando J. Parodi	25-07-2003
Ing. Teresa Pérez	29-05-2015
Dr. Victor A. Ramos	29-11-2013
Dr. Carlos W. Rapela	01-06-2007
Dra. Marta Rosen	25-04-2008
Dr. Ing. Ricardo Sanchez Peña	25-10-2013
Dr. Galo Arturo Soler Illia	29-04-2016
Dr. Jorge Solomín	24-06-2005
Dr. Sebastian Uchitel	13-12-2019
Dra. Carolina Vera	25-10-2019
Dr. Roberto Williams	27-03-2009
Dr. Víctor Yohai	29-10-1999
Dra. Noemí Zaritzky	29-09-2017
Dr. Fernando Omar Zuloaga	28-03-2014

ACADÉMICOS ELECTOS EN 2020 (aun no incorporados)

Dr. Carlos L. Ballaré electo el 28-08-2020
Dr. Osvaldo Civitarese electo el 30-10-2020
Dr. Daniel Enrique de Florian electo el 30-10-2020
Dr. Gabriel Rabinovich electo el 28-08-2020

ACADÉMICOS EMÉRITOS

Dr. Jorge Arvía

Dr. Enrique J. Baran

Dr. Gustavo Corach

Dr. Francisco de la Cruz

Dr. Norberto A. Fava

Dr. Roberto J. Fernández Prini

Dr. Roberto P. J. Perazzo

Dr. Alberto Pignotti

Ing. Horacio C. Reggini

Dr. Héctor Vucetich

Dra. Mariana D. Weissmann

ACADÉMICOS HONORARIOS

Dr. Daniel R. Bes

Dr. Mario Bunge (fallecido el 24-02-2020)

Dr. Richard Ernst

Dr. León L. Lederman

Dr. Yuan Tseh Lee

Dr. Pierre Louis Lions

Dr. Chintamani N.R. Rao

ACADÉMICOS CORRESPONDIENTES NACIONALES

Dr. Nicolás Andruskiewitsch (Córdoba)

Dr. Carlos Balseiro (Bariloche)

Dr. Néstor O. Bianchi (La Plata)

Dr. Antonio Blanco (Córdoba; fallecido el 23-04-2020)

Dr. Hernán Cendra (Bahía Blanca)

Ing. Roberto O. Cudmani (S. M. de Tucumán)

Dr. Ing. Rodolfo F. Danesi (S. M. de Tucumán)

Dr. Diego de Mendoza (Rosario)

Ing. Luis D. Decanini (Córdoba)

Dr. Pedro Depetris (Córdoba)

Dra. Sandra Díaz (Córdoba)

Dr. Alejandro Fainstein (Bariloche)

Dr. Ricardo N. Farías (S. M. de Tucumán)

Dra. Karen Hallberg (Bariloche)

Dra. Eleonor Harboure (Bahia Blanca)

Ing. Luis J. Lima (La Plata)

Dr. Arturo López Dávalos (Bariloche)

Dr. Hugo J.F. Maccioni (Córdoba)

Dr. Roberto A. Macías (Santa Fe)

Dr. Ezio Marchi (San Luis)

Dr. Jorge Eduardo Marcovecchio (Bahía Blanca)

Dr. Rafael Panzone (Bahía Blanca)

Dr. Rubén D. Piacentini (Rosario)

Dra. María Ines Platczek (Bahía Blanca)

Ing. Carlos A. Prato (Córdoba)

Ing. Juan Carlos Reimundín (S. M. de Tucumán)

Ing. Jean Riubrugent (La Plata)

Dr. Juan A Tirao (Córdoba)

Ing. Jorge R. Tosticarelli (Rosario)

Dr. Walter E. Triaca (La Plata)

Dr. Rubén H. Vallejos (Rosario)

Dr. Alejandro Vila (Rosario)

Dra. Noemi Walsoë de Reca (Ciudad Autónoma de Buenos Aires)

ACADÉMICOS ELECTOS EN 2020 (aun no incorporados)

Dr. Alberto Caneiro (Bariloche; electo el 29-05-2020)

ACADÉMICOS CORRESPONDIENTES EN EL EXTERIOR

Dr. Miguel Angel Alario y Franco (Madrid, España)

Dr. Jorge E. Allende (Santiago de Chile, Chile)

Dr. Daniel Amati (Trieste, Italia)

Dr. Eduardo J. Ansaldo (Saskatchewan, Canadá)

Dr. Francisco E. Baralle (Trieste, Italia)

Dr. Allen J. Bard (Texas, Estados Unidos)

Dr. Miguel A. S. Basei (San Pablo, Brasil)

Dr. Klaus-Jürgen Bathe (Massachusetts, Estados Unidos)

Dr. José Luis Bernabeu Alverola (Valencia, España)

Dr. David I. Blockley (Bristol, Inglaterra)

Dr. Kare Bremer (Estocolmo, Suecia)

Dr Oscar P. Bruno (California, Estados Unidos)

Dr. Luis A. Caffarelli (New Jersey, Estados Unidos)

Dr. César A. Carranza Saravia (Lima, Perú)

Dr. Eduardo E. Castellano (San Pablo, Brasil)

Dra. Catherine Cesarsky (París, Francia)

Dr. Michael Clegg (California, Estados Unidos)

Dr. Juan Alberto Costamagna (Santiago de Chile, Chile)

Dr. Ubiratan D'Ambrosio (Campinas, Brasil)

Dra. Angela F. Danil de Namor (Surrey, Inglaterra)

Dr. Walter F. Davidson (Ontario, Canadá)

Dr. Antonio F. R. de Toledo Piza (San Pablo, Brasil)

Prof. Patrick J. Dowling (Surrey, Inglaterra)

Dr. Horacio A. Farach (South Caroline, Estados Unidos)

Dr. Rodolfo Gambini (Montevideo, Uruguay)

Dr. Eduardo D. Glandt (Pennsylvania, Estados Unidos)

Dra. Gabriela González (Louisiana, Estados Unidos)

Dr. Ing. Rafael A. Guarga Ferro (Montevideo, Uruguay)

Dr. Cristian Gutiérrez (Pennsylvania, Estados Unidos)

Dr. Shyam L. Kalla (Maracaibo, Venezuela)

Dr. Eugenia Kalnay (Maryland, Estados Unidos)

Dr. Bernt Krebs (Münster, Alemania)

Dr. Michio Kuriyagawa (Kyoto, Japon)

Prof. Pierre Lená (Paris, Francia)

Dr. Enrique P. Lessa (Montevideo, Uruguay)

Dr. Eduardo A. Lissi Gervaso (Santiago de Chile, Chile)

Prof. Achim Müller (Bielefeld, Alemania)

Dr. Daniele Mundici (Firenze, Italia)

Dr. Eduardo L. Ortiz (Londres, Inglaterra)

Dr. Rafael Radi (Montevideo, Uruguay)

Dr. Peter H. Raven (Missouri, Estados Unidos)

Dr. Lázaro Recht (Caracas, Venezuela)

Ing. Daniel Resasco (Oklahoma, Estados Unidos)

Dr. Ing. Jorge Riera (Porto Alegre, Brasil)

Dr. Juan G. Roederer (Alaska, Estados Unidos)

Dr. Herbert W. Roesky (Göttingen, Alemania)

Ing. Agr. Osvaldo E. Sala (Providence, Estados Unidos)

Ing. Agr. Juan Carlos Santamarina (Georgia, Estados Unidos)

Dr. Alberto Sirlin (New York, Estados Unidos)

Dr. Igal Szleifer (Evanston, Illinois, USA)

Dr. Peter Thieberger (New York, Estados Unidos)

Prof. Dr. Tan Tjong-Kie (Taipei, Taiwan)

Dr. José Luis Torrea Hernández (Madrid, España)

Dr. Sergio Trasatti (Milán, Italia)

Dr. Miguel Angel Virasoro (Roma, Italia; actualmente Profesor Honorario del Instituto de Ciencias de la Universidad Nacional de General Sarmiento, Argentina)

Prof. Ing. Walter Wittke (Aachen, Alemania)

Dr. Rubén H. Zamar (Vancouver, Canadá)

ACADÉMICOS ELECTOS EN 2019-2020 (aun no incorporados)

Dr. Ricardo Fraiman Maus (Montevideo, Uruguay; electo el 11-12-2020)

Dr. Francisco Herve Allamand (Santiago, Chile; electo el 11-12-2020)

Dr. Max Lu (Surrey, Reino Unido; electo el 26-07-2019)

Dra. Miriani Pastoriza (Porto Alegre, Brasil; electo el 30-10-2020)

Dra. Verónica Ganduglia (Madrid España; electa el 30-10-2020)

SESIONES ORDINARIAS

Las Sesiones ordinarias se realizaron entre abril y diciembre de 2020, debiendo suspenderse el plenario de marzo, ya que por el Decreto del Poder Ejecutivo Nacional 267-2020, se decretó para toda la ciudadanía el aislamiento social preventivo y obligatorio. Las fechas correspondientes fueron: 24 de abril, 29 de mayo, 26 de junio, 31 de julio, 28 de agosto, 25 de septiembre, 30 de octubre y 12 de diciembre de 2020. El detalle da lo actuado en cada sesión puede ser consultado en la Memoria 2020 en el sitio web de la ANCEFN (www.ancefn.org.ar).

En la sesión del 24 de abril de 2020 se aprobó la constitución de la nueva Mesa Directiva para el período 1-5-2020 al 30-4-2022, de acuerdo con los resultados de la votación electrónica efectuada, quedando integrada de la siguiente forma:

Presidente: Dr. Víctor Ramos

Vice-Presidente: Dra. Gloria Dubner Secretario General: Dr. Miguel Laborde

Secretario de Actas: Dr. Ricardo Sánchez Peña

Tesorera: Ing. Teresa Pérez

Pro-tesorera: Dra. Alicia Dickenstein

Suplente: Dr. Galo Soler Illia

Suplente: Dr. Demetrio Boltvoskoy

También se integra a la Mesa Directiva el Dr. Roberto Williams en su

carácter de Presidente Saliente.

El 29 de mayo de 2020 las Secciones propusieron sus autoridades, las cuales fueron aprobadas por el Plenario en forma unánime quedando constituidas como sigue:

Ciencias Químicas, de la Tierra y Biológicas: Presidente: Acad. Norma S. Nudelman. Secretario: Acad. Galo A.J Soler Illia

Ciencias de la Ingeniería y la Tecnología: Presidente: Acad. Ing. Raúl Lopardo. Secretaria: Acad. Teresa Pérez

Matemática, Física y Astronomía: Presidente: Acad. Gloria Dubner. Secretario: Acad. Jorge Solomín.

En la sesión del mes de noviembre se llevó a cabo la entrega de premios ANCEFN 2020.

DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

Durante el año 2020 el ciclo de Cafés Científicos pudo ser llevado a cabo, con la asistencia del Ministerio de Ciencia e Innovación Productiva. El tradicional ciclo, que tenía lugar en el Café Tortoni, pasó a denominarse Conversaciones con la Academia, y se realizó mediante plataforma virtual desde el canal de Youtube del Centro Cultural de la Ciencia-C3. Las charlas, coordinadas por la prestigiosa periodista científica Nora Bär, permitieron convocar a numerosos científicos y público en general que no residen en Buenos Aires.

Las actividades organizadas en 2020 fueron las siguientes:

Buscando vida en el universo. A cargo de la Dra. Ximena Abrevaya y los Dres. Guillermo Lemarch y Pablo Mauas (13 de agosto de 2020)

Terremotos: ¿Porque ocurren? ¿Se pueden prevenir? A cargo de la Dra Patricia Alvarado y el Dr. Carlos Costa (10 de septiembre de 2020)

PUBLICACIONES

En mayo de 2020 se editó el Tomo 71 de los Anales de la ANCEFN, correspondiente al año 2019, a cargo del Dr. Enrique Baran (https://www.ancefn.org.ar/contenido.asp?id=2665).

Se editó y publicó el libro "Pandemia: Los múltiples desafíos que el presente le plantea al porvenir" Solanet, M.A. (ed.) 380 pp., Buenos Aires. Este volumen es resultado del IX Encuentro Interacadémico 2020, donde participaron las 20 Academias Nacionales. La ANCEFN contribuyó con el capítulo "Perspectivas desde las Ciencias Exactas y Naturales" (pp. 139-171), coordinado por los Académicos Norma S. Nudelman, Alicia Dickenstein, Ricardo Sánchez Peña, Sebastián Uchitel, Miguel Laborde y Carolina Vera (https://www.ancefn.org.ar/user/FILES/VARIOS/Academias_2020_COMPLE TO.pdf).

En diciembre de 2020 se completó el volumen 16 de la serie Publicaciones Científicas de la ANCEFN: "Residuos plásticos en Argentina: su impacto ambiental y en el desafío de la economía circular", editado por la Dra. Norma Sbarbati Nudelman

(https://www.ancefn.org.ar/user/FILES/Residuos_plasticos-2.pdf).

PARTICIPACIÓN en REUNIONES NACIONALES e INTERNACIONALES y COMUNICACIÓN INSTITUCIONAL

La Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales mantiene un alto perfil en su interrelación con instituciones internacionales. Durante el 2020, las reuniones realizadas en forma virtual, permitieron a la Academia participar de diferentes programas y discusiones. La participación, a través de nuestros representantes, incluyó los siguientes eventos:

IANAS (Interamerican Network of Academies of Science) CE (Clean Energy), Académico Presidente Victor A Ramos.

IANAS IAP (Interacademy Partnership) - SEP (Science Education Programme), Académica Norma Sbarbati Nudelman.

IANAS Agua, Académico Raúl Lopardo.

IANAS Women for Sciences, Académica Gloria Dubner.

S20 (Science 20), anfitrión Arabia Saudita, Académico Presidente Victor Ramos.

Comité Interacademias, Académicos Miguel Laborde y Ricardo Sánchez Peña. IANAS-IAP Conference on Sustainable Development Goals, Académico Roberto Williams.

Durante el año 2020, la Academia auspició el XLVIII Congreso Argentino de Genética, celebrarado en modalidad virtual entre los días 24 y 26 de septiembre de 2020.

Conjuntamente con la Academia Nacional de Geografía, se difundió una Declaración por los 500 Años del descubrimiento fehaciente de las Islas Malvinas.

La Declaración de la Academia Nacional de Medicina sobre el papel del equipo de salud durante la pandemia de Covid 19 fue apoyada institucionalmente por esta ANCEFN.

La página Web www.ancefn.org.ar se continuó actualizando permanentemente con novedades, noticias, publicaciones, etc. Esta página refleja las noticias y actividades desarrolladas e impulsadas por la Academia y sus académicos. Teniendo en cuenta la importancia que tienen hoy en día las redes sociales, también se cuenta con una página de Facebook. Durante el 2020, se incorporó la red social Instagram (@ancefn9), para la difusión de novedades, convocatorias y comunicaciones con el objeto de ampliar el acceso a una creciente cantidad de interesados en las actividades promovidas.

INSTITUTO de BOTÁNICA DARWINION

La ANCEFN, desde 1934, y luego conjuntamente con el CONICET, tiene bajo su dependencia el Instituto de Botánica Darwinion (IBODA), donado por quien fuera Académico Titular, el Dr. Cristóbal M. Hicken, y situado en el barrio Parque Aguirre, en la localidad de San Isidro, provincia de Buenos Aires. El IBODA está dedicado especialmente a estudios taxonómicos de la flora argentina.

Posee un herbario con más de 600.000 ejemplares, existiendo una importante y valiosa cantidad de material del siglo XIX. El incremento anual es del orden de los 7.000 ejemplares, por nuevas colecciones y canjes con otras instituciones nacionales e internacionales. Su biblioteca, conformada por unos 60.000 volúmenes, de los cuales alrededor de 100 son obras del siglo XVIII y algunas de suma rareza del siglo XVI, es una de las más completas y dinámicas de América Latina en el campo de la Botánica. El IBODA edita la mundialmente prestigiosa revista "Darwiniana", dedicada a difundir primordialmente trabajos originales sobre sistemática, florística, palinología, etnobotánica, etc. Asimismo, edita el boletín "Hickenia", cuyo objetivo es la publicación rápida de artículos breves con novedades botánicas, tales como la descripción de taxones nuevos y la resolución de problemas taxonómicos y de nomenclatura. El sitio Web del IBODA (www.darwin.edu.ar), permite el acceso al Catálogo de la Flora Vascular de Argentina y a los resúmenes de los trabajos publicados en "Hickenia" y "Darwiniana".

La Academia tiene un programa de apoyo de financiamiento de las actividades ordinarias del Instituto.

El Director del Instituto de Botánica Darwinion eleva anualmente la rendición de los gastos incurridos por el Instituto con los fondos provistos por esta Academia y por el resto de las instituciones que apoyan financieramente el desarrollo del Instituto.

Las actividades del IBODA llevadas a cabo durante 2020 están detalladas en la Memoria correspondiente (www.ancefn.org.ar).

Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Argentina), Tomo 72, 2021
INCORDODACIONEC LA CARÉMICOS
INCORPORACIONES de ACADÉMICOS

Incorporación de la Dra. Carolina Vera como Académica Titular (26 de junio de 2020)

El 26 de junio de 2020 hemos realizado la primera incorporación en forma virtual de una nueva académica titular. En esta ocasión debido a las medidas de aislamiento social, preventivo y obligatorio decretada por el gobierno nacional ante la pandemia de Covid-19, la Academia tampoco ha podido celebrar el 146° aniversario de su fundación. Sabemos que para una Academia el reconocimiento de científicos y su incorporación es uno de los actos académicos más importantes, no solamente porque se reconoce y se selecciona entre brillantes científicos con que cuenta nuestro país, a personalidades destacadas por sus aportes a la ciencia, sino que es también para la institución un honor incorporar científicos de valía como en este caso a la Doctora Carolina Vera. Invitamos a la Doctora Norma Sbarbatti Nudelman a presentar a la nueva académica. El acto se cerró invitando a los presentes a participar en un futuro próximo en forma presencial a la entrega de diplomas de los nuevos académicos tan pronto la epidemia lo permita y agradeciendo a todos su participación.

Víctor A. Ramos

Presentación de la Dra. Carolina Susana Vera



Carolina Vera es Licenciada en Ciencias Meteorológicas de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN) de la UBA, y Doctora de la Universidad de Buenos Aires. Cabe destacar que su Directora de Tesis fue la Dra. Eugenia Kalnay, argentina y una muy destacada profesional en la NASA (USA).

En la actualidad, es Profesora Titular en el Depto. de Cs. de la Atmósfera y los Océanos (FCEN), es Investigadora Principal del CONICET; y ha ocupado recientemente cargos importantes como Vice-Decana de la FCEN en el período 2006-2010, Directora del CIMA (2010-2015) y Directora del Instituto Franco-Argentino de estudios del Clima y sus impactos (CNRS-CONICET, 2011-2016).

Tiene más de 60 publicaciones científicas, en revistas indexadas con referato en colaboración con investigadores de muy diversas instituciones,

abarcando un espectro de intereses relacionados con la variabilidad del clima y cambio climático en Sudamérica; la influencia de los procesos atmosféricos y oceánicos de gran escala en el clima de Sudamérica; la dinámica de circulación del hemisferio sur; la predictibilidad climática en Sudamérica, entre otros. Ha publicado un libro en Eudeba con la colaboración de Inés Camilloni; y 3 capítulos en libros publicados en el exterior; amén de una docena de artículos por invitación en revistas internacionales sin arbitraje.

Ha desplegado intensa actividad docente en cursos de grado y postgrado, tanto en el país como en el exterior, dirigió 11 Tesis de doctorado y 12 de Licenciatura, y numerosos becarios del país y del exterior. Ha recibido varios premios entre los cuales merecen destacarse el Premio "Emilio Caimi" a la Trayectoria Científica, otorgado por el Centro Argentino de Meteorología en el 2012, y otro otorgado este año que comentaré después. Tiene una muy activa participación en el IPCC (Panel Intergubernamental en Cambio Climático). Ha dirigido o co-dirigido una gran cantidad de proyectos vinculados con su especialidad, en colaboración con investigadores nacionales y extranjeros, para los cuales ha merecido el otorgamiento de subsidios de la UBA, el CONICET, la Agencia Nacional para la Promocion Científica y Técnica (ANPCyT), y entes internacionales como el CNRS, la NSF, etc. También ha prestado importantes servicios científico-técnicos a la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable en el 2006, a la Oficina Provincial de Desarrollo Sostenible en el 2015 y al Servicio Meteorológico Nacional en 2016.

Además de sus prestigiosos proyectos científico-tecnológicos quiero destacar una característica muy excepcional de Carolina, cual es su participación en numerosos eventos de divulgación sobre diversos temas, muchos de ellos relacionados con el tan acuciante problema de la variabilidad climática y los problemas que ocasiona, la necesidad de adoptar urgentes medidas tendientes a la mitigación del cambio climático, etc. En tal sentido, desde hace más de 10 años, con total generosidad está presente en distintos eventos brindando charlas de divulgación, y también como protagonista en foros variados. En particular, podemos mencionar la elaboración, con Adrián Paenza, de 4 micros en el Programa "Científicos Industria Argentina" en el 2008, ha sido protagonista en varios capítulos en el Canal Tecnópolis, en el Canal Encuentro, también en el ciclo TED por el Rio de la Plata, en el CCK, y en numerosas Universidades Nacionales de todo el país.

Por toda esta excepcional actividad, añadida a su prestigiosa trayectoria científico-tecnológica, se ha hecho acreedora al Premio "Cleveland Abbe" de la American Meteorological Society, que le fue otorgado este año "por su devoción al avance científico sobre Ciencias del Clima y su comunicación a los tomadores de decisión y partes interesadas en Sudamérica y en el Mundo".

Norma Sbarbati Nudelman

Incorporación de la Dra. Graciela Boente como Académica Titular (31 de julio de 2020)

El 31 de julio de 2020 se realizó nuevamente el acto académico en forma virtual ante la persistencia de la pandemia de Covid-19 y las restricciones de aislamiento aún vigentes. Como Presidente de esta Academia, les doy la bienvenida a todos los presentes a este emotivo acto, uno de los más importantes de la Academia que viene funcionando desde 1874, una de las instituciones de su tipo más antigua del país y que ha tenido una pléyade de prestigiosos matemáticos entre los que se destaca el Dr. Luis Santaló, discípulo dilecto de Rey Pastor, que fuera presidente de nuestra institución. Con la presidencia del Dr. Santaló se inició una serie de nuevos miembros y presidentes de esta Academia de ciencias procedentes de las matemáticas, que culmina hoy con la incorporación de la Doctora Graciela Boente. Invitamos al Doctor Víctor Yohay a presentar a la nueva académica.

Víctor A. Ramos

Presentación de la Dra. Graciela Boente



La Dra. Graciela Boente obtuvo el título de Licenciada en Matemática de la Universidad de Buenos Aires en 1978 y el título de Doctora en Matemática de la misma Universidad en 1983. Tuve el privilegio de ser su director de tesis.

Ha desarrollado una intensa labor científica en Estadística con 77 trabajos publicados en prestigiosas revistas internacionales, 5 de los cuales fueron publicados en el Annals of Statistics, la revista más importante de Estadística Matemática.

Alguno de los temas en los que ha trabajado fueron estimación no paramétrica de densidades, estimación no paramétrica de regresión, análisis de datos funcionales y estimación robusta en modelos lineales generalizados. En todos estos temas sus trabajos han tenido un alto impacto siendo citados en las principales publicaciones del área.

En los últimos 10 años ha participado como conferencista invitada en 18 congresos internacionales.

Actualmente es Profesora Titular Plenaria del Departamento de Matemática de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires e Investigadora Superior del CONICET.

Ha sido Directora del Instituto de Cálculo de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, 1998-2008. Ejerció la Dirección de la Maestría en Estadística Matemática de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, 2013-2016.

Ha obtenido los siguientes premios y distinciones:

Fellowship de la John Simon Guggenheim Memorial Foundation, septiembre de 2001-agosto 2002.

Premio Consagración de la Sección de Matemática, Física y Astronomía de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2008.

The Constance van Eeden Fund for Honouring Distinguished Achievement in Statistics, Canada, 2009.

Fellow del Institute of Mathematical Statistics (IMS), 2013. Esta distinción es especialmente importante ya que solo se otorga a los más destacados investigadores en esta área.

Ha intervenido en proyectos en colaboración con importantes centros internacionales como las Universidad de la República, Uruguay, Universidad de Lisboa, Universidad de Santiago de Compostela, Universidad de Vigo, University of Illinois, University of California at Davis, la Universita Ca'Foscari de Venecia y University of British Columbia, Canadá.

También ha realizado un importante trabajo en formación de recursos humanos habiendo dirigido 8 tesis de doctorado, 11 de maestría y 11 de licenciatura.

Además de todos los méritos académicos mencionados, no puedo dejar de referirme a las cualidades personales de la Dra. Boente, siempre dispuesta a colaborar con sus compañeros de trabajo para resolver todos los problemas que se presentan en las instituciones donde ella actúa.

Considero que por todos los méritos mencionados, la incorporación de la Dra. Boente como Académica Titular significará un aporte muy valioso para el crecimiento de las actividades de nuestra institución.

Graciela, es una gran alegría para mí y con seguridad para todos los que te conocen tu incorporación a esta Academia. Bienvenida.

Víctor J. Yohai

Incorporación del Dr. Sebastián Uchitel como Académico Titular (31 de julio de 2020)

A continuación de la incorporación de la Dra. Boente se realizó ese mismo día en el mismo acto académico la disertación del Dr. Sebastián Uchitel sobre "¿La Ingeniería de software, es un juego? Verificación y síntesis de estrategias de juegos como abordaje a la problemática de construcción de software correcto". Después de las palabras de bienvenida del presidente Dr. Víctor Ramos se invitó al Dr. Carlos Muravchik a presentar al nuevo académico. El acto se cerró invitando a todos los participantes a la entrega de diplomas de los nuevos académicos cuando las circunstancias de la pandemia lo permitan.

Víctor A. Ramos

Presentación del Dr. Sebastián Uchitel



Sebastián Uchitel, nació en 1971, obtuvo el título de Analista Universitario en Computación en 1995 y tres años después el de Licenciado en Computación, en ambos casos en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, y es PhD en Computación del Imperial College de Londres (2003).

Se especializó en la modelación y análisis automático de artefactos vinculados al desarrollo del software. Usaré unas frases del propio investigador para comprender el objetivo de la tarea de un especialista en la ingeniería de software: "Pensamos en las herramientas que se pueden generar para que los programadores desarrollen un software confiable y de mejor calidad. Sin embargo, no nos limitamos a pensar en las aplicaciones que podrían ser útiles para los teléfonos celulares, sino que concentramos los esfuerzos en el "detrás de la escena", en su funcionamiento. Por ejemplo, nos interesa saber de qué manera los programas podrían consumir menos energía y también reflexionamos sobre algoritmos para resolver las situaciones más complejas".

Cuenta con cinco libros como autor o coautor, dos de ellos en carácter de miembro de equipo editor, cinco capítulos de libros, veintitrés artículos en las revistas más reconocidas de la especialidad y cincuenta y siete publicaciones en congresos y simposios de relevancia. Según Google posee un índice H = 35, y más de 5.200 citas bibliográficas.

Es Profesor Titular de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA y director de su Instituto de Investigación en Ciencias de la Computación (CONICET-UBA). Previamente ejerció como Director del Departamento de Computación y la codirección del Laboratorio de Fundamentos y Herramientas para la Ingeniería de Software.

Ha dirigido una docena de estudiantes de doctorado en Argentina, Alemania, Brasil y Reino Unido. Fue *Lecturer* y luego *Reader* del Departamento de Computación en el Imperial College de Londres. En 2008 fue también Profesor Visitante en el *National Institute of Informatics* de Japón.

Desde 2016 es Investigador Principal del CONICET. De 2012 a 2015 fue Director Independiente Titular del Directorio de YPF S.A.

Es editor asociado de las revistas especializadas "Science of Computer Programming" y "Requirements Engineering Journal" y en años anteriores lo fue de "Transactions on Software Engineering".

Presidió la Conferencia Internacional de Ingeniería de Software de IEEE/ACM en 2017 y los comités de programa de varias otras importantes conferencias, como el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), y la ACM (Association for Computer Machinery). Ambas son las sociedades mundiales de mayor prestigio científico y profesional en su temática.

Ha desarrollado una extensa y activa participación en numerosos organismos de ciencia y tecnología. Fue Coordinador de Prospectiva en Ingeniería de Software, en el MINCyT, Miembro de la Comisión de Becas, y de la de Promociones, en Informática y Comunicaciones del CONICET y Cocoordinador, luego Coordinador, de la Comisión de Informática y Comunicaciones de la Agencia. Integró el Comité de Especialistas, de la Fundación Sadosky, y el Comité de Especialistas de Tecnópolis TV en el MINCYT. De 2013 a 2016 integró el Consejo Asesor del Sistema Nacional de Cómputo de Alto Desempeño.

Desarrolló actividad profesional de transferencia, como Programador Independiente, como Socio Fundador y director de una compañía, como Coordinador de un Convenio de Asistencia Técnica UBA-Aerolíneas Argentinas, y como director de la Plataforma Tecnológica de Ingeniería de Software de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA.

Recibió numerosos premios y distinciones. Por su actuación como Lecturer y Reader en el Reino Unido, y el Faculty Award de IBM en Estados Unidos. En 2007 recibió la Mención como octavo en el ranking mundial de investigadores en Ingeniería de Software según la ACM; el Starting Grant Award del European Research Council y el Premio a la Trayectoria y Reconocimiento Internacional de la Cámara de Software y Servicios Informáticos de Argentina. En 2008 fue galardonado con el premio estímulo de esta Academia, y en 2010 con el Software Engineering Innovation Foundation Award, de Microsoft Research, en Estados Unidos.

Fue distinguido con Diploma al Mérito de los Premios Konex en Ciencia y Tecnología de la década 2003-2013, en el rubro "Tecnologías de la Información y las Comunicaciones" y también en 2013 obtuvo el premio Houssay del MINCyT. En 2015 recibió el premio Investigador Distinguido de la ACM y en 2018 fue reconocido como "top 5" de los últimos veinticinco años en temas de Modelado en Ingeniería de Software, por la revista Software del IEEE.

Es un gran honor haber introducido al Dr. Sebastián Uchitel quien nos ilustrará ahora con sus conceptos.

Carlos H. Muravchik

Incorporación del Dr. Pablo Ferrari como Académico Titular (28 de agosto de 2020)

El 28 de agosto de 2020, continuando con los actos académicos virtuales, se procedió a la incorporación del Dr. Pablo Ferrari como nuevo miembro de la Academia. En este acto de incorporación, uno de los eventos más relevantes de la Academia que se viene realizando desde hace casi 150 años, se ha seleccionado a destacados científicos que han tenido un importante impacto tanto en nuestra sociedad como en la comunidad científica. En este caso hoy es muy grato incorporar a un nuevo académico, el Dr. Ferrari. Invitamos a la académica Dra. Alicia Dickenstein para que nos haga la presentación. El acto se cerró con el agradecimiento a todos los participantes y con un fuerte voto para que a la brevedad se pueda hacer en forma presencial la entrega de los diplomas y brindar todos juntos por esta incorporación.

Víctor A. Ramos

Presentación del Dr. Pablo A. Ferrari



Es una gran alegría para mí presentar al Dr. Pablo Ferrari en su Incorporación como Académico Titular de la Academia de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales.

Pablo Ferrari obtuvo el título de Licenciado en Cs. Matemáticas en la UBA en 1974. En 1977, luego de un breve paso como Profesor Asistente en la Universidad Tecnológica Nacional de Tucumán y en el Instituto de Matemática, Astronomía y Física de la Universidad Nacional de Córdoba, tuvo que emigrar en 1977 con su familia a Brasil. Allí obtuvo una Maestría en Estadística en 1978 y un Doctorado en Estadística en 1982, en el Instituto de Matemática y Estadística de la Universidad de San Pablo, donde fue luego Profesor hasta 2009.

Tuvo una exitosa carrera académica en Brasil, de la que dan cuenta las siguientes distinciones: obtuvo una Beca Guggenheim en 1999 y el Premio Consagración de esta Academia en 2011, es Fellow del International Statistical Institute desde 2005, es Miembro Titular de la Academia Brasileira de Ciências desde 2011 y es Fellow del Institute of Mathematical Statistics desde 2013.

Trabaja en el área de probabilidad y procesos estocásticos, más precisamente en la frontera entre Mecánica Estadística y Probabilidad. Motivado por fenómenos físicos, estudia la matemática de sistemas aleatorios con muchas componentes con interacción local que evolucionan en el tiempo. Ha publicado más de 200 trabajos de investigación en reconocidas revistas de circulación internacional, ha sido editor de varias de ellas y ha realizado una intensa tarea de formación de recursos humanos: dirigió 5 tesis de maestría, 16 tesis de doctorado y una en curso (según enumera en su currículum, estas son las nacionalidades de sus alumnos y alumnas: 7 argentinos, 1 uruguayo, 1 mexicano, 4 brasileños, 1 ruso, 1 serbia, 1 chilena, 1 peruano) y 21 posdoctorados.

En 2009 Pablo Ferrari regresó a la Argentina como Profesor Titular en el Departamento de Matemática de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Creó de la nada un importante y productivo grupo de investigación en Probabilidades, que organizó en Argentina prestigiosos congresos internacionales. Fue ascendido a Investigador Superior del CONICET en 2016 y desde 2018 es Profesor Emérito de la Universidad de Buenos Aires.

Pablo disfruta de trabajar en equipo tanto con investigadores ya formados como con jóvenes doctores y estudiantes. La imagen que tengo de todos estos últimos años es de verlo siempre trabajando, con la puerta de su oficina abierta, en general con colaboradores y alumnos, extasiados pensando algo juntos frente al pizarrón. Su influencia ha sido y será muy beneficiosa para la matemática argentina.

Alicia Dickenstein

Incorporación del Dr. Miguel Angelo Stipp Basei como Académico Correspondiente (25 de setiembre de 2020)

El 25 de setiembre de 2020 se realizó la incorporación del nuevo miembro correspondiente en forma virtual. En esta oportunidad para la institución es muy grato incorporar a un nuevo científico. Desde el año 1874 nuestra Academia ha distinguido a los más destacados científicos tanto del país como del extranjero. Hoy nos toca incorporar a una persona que es referente en Ciencias de la Tierra de la hermana República de Brasil, el Dr. Miguel Basei. Para que nos cuente sus antecedentes y los motivos que han llevado a su incorporación invitamos al Dr. Carlos Rapela a que nos haga su presentación. Después de una serie de comentarios y preguntas muy interesantes, se abrieron los micrófonos para recibir un fuerte aplauso de los participantes, invitándose nuevamente al acto presencial de entrega de diplomas que se realizará en un futuro próximo cuando la pandemia lo permita.

Víctor A. Ramos

Presentación del Dr. Miguel A. S. Basei



Es para mí un gusto muy grande presentar al Dr. Miguel Angelo Stipp Basei como Académico Correspondiente. Y digo esto porque conozco al Dr. Basei, desde hace muchos años, ya que se ha especializado en metodologías y temáticas geológicas muy semejantes en las que yo he trabajado personalmente. Conocí a Miguel Basei hace muchos, en un congreso científico en Santiago de Chile. No fue en una sesión científica, sino en un partido de fútbol que jugaban después de las sesiones los investigadores brasileros contra los chilenos. Los brasileros tenían la técnica, pero los chilenos incluían a muchos becarios jóvenes, con lo cual los partidos se hacían muy reñidos y festejados. Desde ese entonces nos hemos encontrado muchas veces en reuniones científicas, e incluso y compartido algún trabajo. Por esa misma razón conozco y valoro los importantes méritos científicos que representan sus contribuciones a la comprensión de la historia geológica del continente sudamericano, y su relación, especialmente con África.

Miguel Angelo Stipp Basei se graduó en Geología en 1972 en la Universidad de Sao Paulo, Master en Geoquímica y Geotectónica en 1977, Doctor en Geociencias, Geoquímica y Geoetectónica en 1985, también en la misma universidad bajo la dirección de Umberto Cordani, considerado uno de los fundadores sino el padre de la Geocronología en América del Sur. Realizó estudios de especialización en geología isotópica y geocronología, en la Universidad de Motntpellier en Francia; en la Universidad de Oxford en Inglaterra; en la Universidad Nacional de Australia: en la Academia China de Ciencias Geológicas y de postgrado en la Universidad de Kansas, Estados Unidos, en la Open University en Inglaterra y en la Universidad Georg-August en Alemania.

Desde 1975 a la actualidad, ha sido Profesor en el Instituto de Geociencias en la Universidad de Sao Paulo, en la disciplinas Geología de Campo, Geología Estructural y Tectónica. Y desde 2005 Profesor Titular. Es Miembro de la Academia Brasileira de Ciencias y se ha desempeñado como Director del Centro de Pesquisas Geocronológicas de la Universidad de Sao Paulo, en donde desde 2009 es el Coordinador responsable del Laboratorio de Laser ICP de Espectrometría de Masas del mismo Centro. Ha dirigido numerosas tesis doctorales y tesinas de grado.

Su experiencia en Geociencias, se ha focalizado en la Geocronología, en particular en la geocronología U-Pb en circones, para investigar la historia de los cinturones orogénicos de América del Sur y del SW de África.

Ha publicado más de 150 trabajos en revistas de alto impacto de la especialidad, los cuales tienen más 7500 citaciones. Debe destacarse en que en esa amplia producción hay una significativa parte que se hecho en colaboración con colegas científicos argentinos y en provincias geológicas de nuestro país, en particular nuestras vastas Sierras Pampeanas. Resulta también importante subrayar que esa colaboración haya incluido investigadores jóvenes, y también en proceso de obtener su tesis doctoral, con metodología que no disponía nuestro país.

Para terminar este resumen de la carrera científica del Dr. Basei, quisiera hacerlo ahora de una manera no-formal, casi una digresión, con el objeto de ilustrar a los colegas académicos que no son geólogos y también para los espectadores virtuales que no son geólogos, acerca de la especialidad científica en la que se distinguió, y distingue actualmente el Dr. Basei.

En Geología, la medida de la variable TIEMPO es fundamental!!! El tiempo es el GRAN ORDENADOR de los procesos que han ocurrido desde que se formó la Tierra hace 4500 millones de años, hasta la actualidad. La geocronología es la rama de la geoquímica que se ocupa de la medición del tiempo en materiales naturales. Cuanto más exactas y precisas sean esas medidas, más exacto y preciso es el conocimiento que tenemos de un proceso natural. No es muy vieja como especialidad; y empezó a aplicarse muy primariamente recién después de la 2da. Guerra Mundial.

El progreso tecnológico que ocurrió desde 1960, creció en forma exponencial, acicateado por la necesidad imperiosa de conocer con exactitud la distribución temporal de los procesos geológicos.

La sofisticación que tienen actualmente los técnicas geocronológicas, son de tal magnitud que nos hubieran parecido de ciencia ficción en la década de 1980 cuando hice mi postdoctorado en el exterior.

Las técnicas geocronológicas que se practican en los laboratorios en los cuales se desempeña el Profesor Basei son de las más sofisticadas que se practican actualmente en geocronología. Se puede determinar la edad de un mineral que contiene uranio como el circón, en cristales que tienen un tamaño de 50-100 micrones y que están en muy pequeña proporción en las rocas, menos del 0.5%. A ese mineral se hace incidir un haz de 10-15 micrones el que analizado por sofisticados espectrómentros de masa, que en ocasiones pueden indicar diferencias importantes de edad entre el borde y el núcleo del cristal. Esto permite acceder a interpretaciones geológicas, que no imaginábamos hace 25 años.

Entre las personas que dirigen este tipo de laboratorio se pueden distinguir dos clases principales de científicos: aquellos que tienen un background formativo muy químico, y su función está restringida al manejo y mantenimientos del laboratorio, y otros que tienen un background mixtogeológico-geoquímico, que también hacen investigación geológica de campo en muchas ocasiones. Miguel Basei se encuentra dentro del segundo grupo de geocronólogos.

Me ha tocado estar con Miguel y otros colegas en una zona de falla en el norte de la Sierra de Velasco en La Rioja, en un sector abrupto, verlo a Miguel tirándose en las rocas con la lupa geológica de mano buscando indicadores cinemáticos. Estos me van a indicar, por ejemplo, si la zona que está a la izquierda de la zona de falla se movió así, o se movió así. Y no da lo mismo que haya sido de una forma o la otra. Ya que las zonas a izquierda y derecha son normalmente sectores extensos, montañas. No da lo mismo.

Y cuando se determina la edad de las rocas con geocronología a uno y otro lado de la falla y en la falla misma con otro tipo de geocronología. La comprensión del fenómeno geológico por el geocronólogo, lo lleva a profundizar más hondamente en las investigaciones sobre el origen y evolución de los continentes.

Espero que esta digresión haya sido útil para ilustrar a los no-geólogos qué clase de geocientífico es el Dr. Miguel Basei: uso y mantenimiento de laboratorios muy especializados, pero también la investigación en la montaña, para entender cómo se formaron los continentes.

La charla que dará Miguel a continuación, que lleva por título "América del Sur y África en la formación del Gondwana Occidental", es ilustrativa de las investigaciones que ha llevado a cabo durante muchos años.

Carlos W. Rapela

Incorporación del Dr. Miguel A. Blesa como Académico Titular (30 de octubre de 2020)

El 30 de octubre de 2020 se realizó la sexta incorporación virtual del año. En ocasión del 146avo. aniversario de nuestra Academia nos es muy grato darle la bienvenida a un nuevo académico. Hoy tenemos el honor de recibir al Dr. Miguel Blesa, un referente indiscutido en su disciplina, y le pedimos al Dr. Galo Soler Illia que nos haga la presentación del nuevo Académico, con la esperanza de una pronta reunión presencial para la entrega de los diplomas y brindar por los nuevos Académicos.

Víctor A. Ramos

Presentación del Dr. Miguel Ángel Blesa



En algún lugar de Texas o Colorado, a fines de los '80, un joven Bono, cantante de la banda U2, presentó al legendario guitarrista B. B. King, con quien compartían escenario, de esta manera: "Cuando uno ve tocar la guitarra a B. B. King, uno cree que es fácil tocar la guitarra". Estas palabras pueden aplicarse perfectamente a nuestro nuevo académico, el Dr. Miguel Ángel Blesa.

Cuando uno ve a Miguel pensando química, uno cree que es fácil hacer química. Hasta que se da cuenta de la complejidad y profundidad de su trabajo, y ve la fibra de la que está hecha su ciencia. Y ahí, es admirable, más allá de sus cientos de publicaciones, miles de citas, y decenas de discípulos y premios.

Recibimos hoy a un colega excepcional, que sintetizando de manera única los campos de la química inorgánica y la físicoquímica nos abrió nuevos horizontes. Miguel Blesa es un maestro en el arte de enlazar conceptos de diferentes ramas de la química, para crear caminos científicos y tecnológicos originales y sólidos.

Miguel nació en Salta, en 1942, se formó como químico en La Plata, y realizó su doctorado sobre la fotoquímica de compuestos organofluorados gaseosos, bajo la dirección del legendario Pedro J. Aymonino. Su

postdoctorado transcurrió en Stanford con el también legendario Dr. Henry Taube, quien fuera después laureado con el Premio Nobel de Química.

Ese bagaje científico le permitió iniciar en la Argentina los estudios de los mecanismos de reacción de iones complejos en solución acuosa, con sus colegas Dres. Aymonino y Olabe, marcando el surgimiento de una importante Escuela en Química de Coordinación en La Plata, que luego se expandió a Buenos Aires y Tucumán.

Luego de un paso por la Facultad de Farmacia y Bioquímica de la UBA, en 1976, Blesa se incorporó a la CNEA, en la que creó y desarrolló el área de los sistemas coloidales acuosos durante 40 años. Sus estudios sobre la disolución de óxidos, además de un notable interés académico, fueron vitales para extender la vida de los circuitos de las centrales nucleoeléctricas.

Comprender la disolución lo llevó a plantearse preguntas sobre el fenómeno inverso: la precipitación. Fue así que se convirtió en un precursor de la síntesis química de materiales. Los trabajos de Blesa y Regazzoni, en colaboración con Egon Matijevic, fueron pioneros en la síntesis de partículas monodispersas de óxidos metálicos. Esas "pelotitas", "cubitos" o incluso "rabas", de los '80 y '90, cuando nadie las llamaba aún nanopartículas, asombraron a una segunda generación de sus discípulos. Nuevamente, el gran aporte de Blesa fue el de recurrir a los conceptos fundamentales de la química para desarrollar métodos racionales de síntesis de nanomateriales. Estos trabajos impulsaron a la Química de Materiales en Argentina, y por extensión, a las nanotecnologías.

La exploración de la adsorción de contaminantes sobre óxidos, y el estudio de la fotocatálisis, fueron los disparadores de su aproximación a la Química Ambiental. En este campo, sus contribuciones sobre la reactividad de los óxidos metálicos en las interfaces con soluciones acuosas generaron investigación de altísima originalidad, calidad e impacto.

Blesa ha realizado, además, docencia universitaria de grado y de posgrado en varias Universidades argentinas: Buenos Aires, La Plata, San Martín, Tucumán, Salta y San Luis, en los campos de la Química Inorgánica, la Química de Materiales y la Química Ambiental. Por sus cursos pasaron muchos de los que hoy son referentes de las Ciencias Químicas en la Argentina.

Desde el punto de vista institucional, Miguel Blesa ha demostrado también un gran compromiso. Además de su actuación en la CNEA, desde mediados de los '80, Blesa se incorporó como Profesor de la FCEN, UBA, participando activamente del desarrollo del DQIAyQF, así como de la creación del INQUIMAE en los '90. En una etapa más reciente, el Dr. Blesa impulsó la creación del Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental de la

Universidad de San Martín. Allí fue el primer director del Doctorado en Ciencia y Tecnología Mención Química, de fuerte impronta ambiental, y ha creado y dirige un proyecto interdisciplinario que busca revitalizar al Conurbano bonaerense. También pasó por la gestión pública como Secretario de Planeamiento y Políticas del MinCyT entre 2015 y 2017, a la que fue convocado por su capacidad de generar un plan estratégico para el sector.

Miguel ha sido, además, Presidente de la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias, y ha impulsado las actividades de redes internacionales como CyTed o Interciencias. Fue socio fundador y Presidente de la Asociación Argentina de Investigación Fisicoquímica. Por último, Miguel ha participado en comités editoriales de revistas internacionales, ha sido editor de revistas nacionales como "Actividad", Ciencia e Investigación Reseñas, y hoy en día es Editor en Jefe de la revista Reviews From the End of the World.

La importancia de sus trabajos le ha deparado una serie de distinciones, entre las cuales cabe destacar el Premio Houssay en 1987, Diploma Konex en Química en 2003, una distinción "A científicos destacados en 2003" del Congreso de la Nación, el Premio "MERCOSUR de Ciencia y Tecnología Integración" en 2006. Sus estudios de materiales para aplicaciones ambientales le valieron el Premio 2004 en Química de la Academia de Ciencias del Mundo en Desarrollo (TWAS). El Dr. Blesa es, además, Académico de la Academia Nacional de Ciencias, y de la Academia Latinoamericana de Ciencias, y Doctor Honoris Causa de la Universidad Nacional de San Martín. La Logia de Changos de la Química lo ha designado Chango de Oro vitalicio.

En suma, Miguel Blesa generó una obra científica de primer nivel mundial que permitió abrir nuevas direcciones en la química, en particular hacia las nanotecnologías y el ambiente. Su aporte se continúa en la legión de tesistas e investigadores que ha formado, que constituye la base de importantes Escuelas en Química de Compuestos de Coordinación, en Química de Nanomateriales, y en Química Ambiental.

Por último, pero no menos importante, queda el Miguel personal. Quienes tuvimos la fortuna de ser sus discípulos reconocemos su generosidad, su capacidad para resolver de manera simple problemas complejos, su habilidad para recordar y formular los nombres impronunciables de ciertos minerales, su particular arte para poner sus dedos sobre nuestras llagas científicas, o su disposición para discutir ciencia y vida en cualquier horario, whisky mediante. ¿Cuántas veces sus frases de cabecera: "nadie sabe más de tu sistema que vos" o "lo perfecto es enemigo de lo bueno" nos impulsaron a mandar ese manuscrito o proyecto, aunque no estuviéramos seguros? ¿Cuántas veces les hemos transmitido esa tradición a nuestros estudiantes?

Pero sobre todo, reconocemos en Miguel la libertad total que nos ha dado para hacer nuestra ciencia, y aprender a partir de nuestra experiencia. Aunque sea a los porrazos. Decía Newton en sus últimos años que se sentía como "...un niño pequeño que, jugando en la playa, encontraba de vez en cuando un guijarro más fino o un caracol más bonito de lo normal. El océano de la verdad—decía Newton- se extendía, inexplorado, delante de mí"

Miguel es aquel padre que, sentado en la playa, nos pone frente a ese océano, nos sigue con la mirada, y se alegra cuando volvemos con algún caracol, por modesto que sea.

Me despido con un poema de Pedro Morando preparado especialmente para esta especial ocasión.

QUERIENDO SER CONSECUENTE (LA MIRADA DISIDENTE)

Un científico brillante, con un prestigio sin par, ofrece en forma constante cosas para festejar.

Sin embargo fue sorpresa, en medio de la pandemia, el saber que Miguel Blesa va a ingresar a la Academia.

Debo decir la verdad: no comparto la medida, pues con toda honestidad el hecho me descoloca, o acaso toda la vida... ¿no dijo que era de Boca?

Y ahora con seriedad: resulta muy merecido. Que sea con felicidad. Y al saludarlo es debido, darle con cordialidad, un codazo bien sentido.

Bienvenido, Miguel a la ANCEFN. Esperamos tu conferencia sobre "La movilización de los óxidos de hierro y cromo: Una mezcolanza de química,

biología y geología".

Galo Soler Illia

Incorporación del Dr. Oscar Bruno como Miembro Correspondiente (20 de noviembre de 2020)

El 20 de noviembre hemos tenido la última incorporación del 2020. La presentación del Dr. Oscar Bruno ha sido fascinante, especialmente para legos en el tema, por su entusiasmo y facilidad de comprensión. Ha causado un muy buen impacto en la audiencia por su didáctica. Cerramos las presentaciones con la promesa realizar un acto presencial tan pronto volvamos a la normalidad, donde le podamos dar a todos los nuevos académicos la bienvenida en nuestra casa y poder brindar para que sigan los éxitos.

Víctor A. Ramos

Presentación del Dr. Oscar Bruno



Es un gran honor y una alegría presentar al Dr. Oscar Bruno en nombre de esta Academia, de la cual ha sido nombrado Miembro Correspondiente.

Conozco a Oscar desde principios de la década del ochenta cuando cursaba sus estudios en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Se recibió de Licenciado en Matemática en el año 1982 y comenzó a trabajar en la misma facultad bajo la dirección del Dr. Eduardo Dubuc en Teoría de Categorías culminando exitosamente su doctorado en dicha área. Sin embargo, luego de esto quiso dedicarse a temas de Matemática que estuvieran más cerca de aplicaciones concretas en otros campos. Por tal motivo viajó al exterior y comenzó a estudiar temas de ecuaciones diferenciales obteniendo el doctorado en esa área en el prestigioso Instituto Courant de la Universidad de Nueva York en el año 1989. Luego de esto, realizó una exitosa carrera llegando como Profesor Asociado al Caltech en 1995 y continuando en ese centro actualmente, siendo Profesor Titular desde 1998. Cabe destacar que este centro de la Universidad de California es uno de los más prestigiosos del mundo en Matemática Aplicada.

Oscar Bruno es un destacado matemático en el área de Análisis Numérico en la que ha realizado contribuciones muy importantes en diversos campos. Introduciendo ideas muy originales, ha logrado utilizar las aproximaciones de Fourier para resolver ecuaciones diferenciales e integrales

de manera muy eficiente. Sus métodos permitieron resolver problemas que resultaban intratables por los métodos numéricos tradicionales debido a diversas dificultades tales como geometrías muy complejas y soluciones con singularidades.

Sus métodos han sido utilizados exitosamente en diversas aplicaciones, incluyendo electromagnetismo, mecánica de fluidos y elasticidad.

Oscar Bruno combina profundas ideas teóricas con métodos computacionales, siendo su trabajo un claro ejemplo de la importancia de la matemática teórica en las aplicaciones.

Por otra parte, desde hace años colabora intensamente con el desarrollo de la Matemática en la Argentina. Esto se manifiesta en sus frecuentes visitas al país, las que realiza prácticamente todos los años para dictar cursos, seminarios y conferencias. También ha realizado investigaciones conjuntas con investigadores del país, participando como investigador residente en el exterior en proyectos financiados por instituciones del país. Además, ha tenido una importante labor en la formación de jóvenes investigadores dirigiendo tesis tanto de licenciatura como de doctorado.

Finalmente, quiero destacar que impresiona el entusiasmo que transmite tanto al trabajar con él como en sus conferencias, demostrando la pasión con la que lleva a cabo su trabajo. Además, es una excelente persona con la cual es siempre un placer dialogar e intercambiar ideas, no sólo de trabajo, sino también de temas generales.

Bienvenido Oscar a la Academia y los dejo con él para que disfruten su presentación.

Ricardo G. Durán

HOMENAJES

Ing. Eduardo Núñez (1933-2020)

Eduardo Núñez nació el 25 de abril de 1933 en la ciudad de Gualeguay, provincia de Entre Ríos y falleció el 7 de julio de este 2020, durante la prolongada cuarentena por la pandemia del COVID-19, en la misma ciudad entrerriana donde había nacido.

Realizó sus estudios a nivel de grado en la Universidad Nacional de La Plata, donde obtuvo el diploma de Ingeniero Civil, en la década del cincuenta.

Obtuvo una beca para estudiar "Obras hidráulicas de hormigón armado y presas de tierra" en Madrid, otorgada por la Dirección General de Relaciones Culturales de España, de 1957 a 1958.

Profundizó sus conocimientos con otros estudios universitarios en el exterior, como el "Advanced Soil Mechanics Course", en la Université de Laval, Québec, Canadá, en 1965, el "Soil Mechanics Program", en Harvard University, en el año 1969 y el curso sobre "Clay Behavior", en el Massachussets Institute of Technology, de Estados Unidos, en 1985.



Ing. Eduardo Núñez (1933-2020)

Su actividad docente se desarrolló fundamentalmente en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, en particular en la cátedra de Mecánica de Suelos y Fundaciones, donde se inició en 1959, fue Profesor Regular Adjunto desde 1965 y Profesor Regular Titular a partir de 1982 (en ambos casos por concurso público). Se retiró de ese cargo en 1998, pero continuó hasta su deceso vinculado a esa pasión docente como Profesor Titular Consulto de la Universidad de Buenos Aires.

También tuvo una importante actividad docente en la Universidad Católica Argentina, que desarrollara entre los años 1967 y 1998. En una primera etapa en calidad de Profesor Adjunto Ordinario y desde en año 1976 como Profesor Titular Ordinario, siempre en la cátedra de Mecánica de Suelos y Fundaciones.

En el año 1993 recibió el diploma al mérito del premio "Konex" en Ciencia y Tecnología, especialidad "Ingeniería Civil". Ese mismo año, esta Academia le otorgó a Eduardo Núñez el premio en Ingeniería Geotécnica "Raúl Marsal", en conjunto con el Ing. Oscar Vardé.

Fue Presidente de la Sociedad Argentina de Mecánica de Suelos (SAMS) durante el período1964-1966 y a la fecha de su fallecimiento continuaba como Miembro Honorario de la Sociedad Argentina de Geotecnia (SAIG).

Participó en numerosos e importantes congresos nacionales e internacionales como autor de trabajos, como panelista, como moderador, como "general reporter" y en varios casos como organizador de sesiones.

Debido a su relevante labor en su especialidad y a sus cualidades éticas, la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales lo designó Miembro Titular de la misma en 1998. Además de su participación siempre activa en los plenarios y comisiones que integrara, presidió entre 2002 y 2004 la Sección de Ingeniería y entre 2004 y 2008 tuvo la responsabilidad de actuar como Secretario de Actas de esta Academia.

A lo largo de su vida profesional ha presentado no menos de dos mil informes técnicos escritos originales sobre problemas de proyecto o ejecución de casos específicos en temas de ingeniería geotécnica. Debe destacarse que al menos el 20% de dichos informes incluyen metodologías propias de análisis, es decir, desarrollos originales del autor.

Desde "Los parámetros de corte obtenidos a partir de los ensayos triaxiales escalonados", en II Congreso Panamericano de MSIF, Tomo II, Brasil (1963) y "Algunas relaciones entre los métodos de cálculo de la carga permisible y el comportamiento real de pilotes de hormigón", Memorias del III Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Caracas, Venezuela (1967), hasta "Case study of the post-earthquake behavior of a CFRD dam", 18th ICSMGE, París, Francia (2013), el Ing. Núñez contribuyó con más de ochenta publicaciones de investigación y docencia en el campo de su especialidad.

Eduardo Núñez tuvo siempre presente que era un ingeniero, que amaba su profesión y que, respetando las otras, nada era comparable a la fortuna de dedicarse a ella. Por ello, se estima oportuno hacer una mención especial a su labor profesional como ingeniero consultor.

En este sentido, cabe mencionar que entre 1959 y 1972 se desempeñó como ingeniero especialista en mecánica de suelos y fundaciones en el Estudio Bolognesi-Moretto, Ingenieros Civiles, y como Representante Técnico - Ingeniero Civil de la firma Mecánica de Suelos SRL, actuando en estudios de suelos y rocas, investigaciones "in situ" y en laboratorio, diseñando, construyendo y operando aparatos y sistemas de mediciones para ensayos de control actuando en proyecto, dirección e inspección de obras y proyecto y dirección de fundaciones, pilotajes, inyecciones y tratamientos especiales de cimentaciones.

Algunos de sus proyectos particularmente importantes las cimentaciones del puente Chaco-Corrientes y la revisión del proyecto de cimentaciones de los puentes del complejo Zárate-Brazo Largo. En cuanto a proyecto y construcción, se destacan las fundaciones de grandes tanques, pilotajes, acerías, refinerías, plantas industriales, puentes, edificios, tratamientos especiales, térmicos e inyecciones, tratamientos en túneles con y sin aire comprimido.

Desde 1973 tuvo a su cargo el Estudio Ingeniero Eduardo Núñez-Ingeniería Geotécnica, interviniendo como ingeniero consultor en estudios de suelos y rocas, ensayos de terreno y laboratorio, proyectos en el área de la ingeniería geotécnica y participante en grupos interdisciplinarios como experto en la especialidad en obras hidráulicas, obras de saneamiento, obras civiles, portuarias, caminos y aeropuertos, evaluación de proyectos y desarrollo urbano e industrial.

A esta etapa pertenecen el proyecto de presa permeable del contra embalse de El Chocón en Arroyito, las presas de materiales sueltos en Salto Grande, el asesoramiento general en geotecnia, incluyendo fundaciones, de las líneas de alta tensión para el proyecto binacional de Salto Grande, proyecto de la presa Piray Guazú, el proyecto ejecutivo de la presa Garabí (Argentina-Brasil), la participación en el proyecto de ingeniería geotécnica de detalle de la presa Piedra del Águila, los proyectos de presas de materiales sueltos en la provincia de San Luis, el asesoramiento durante la construcción del complejo Los Caracoles en la provincia de San Juan y el trabajo pericial para el examen de la presa Potrerillos en la provincia de Mendoza.

Tuvo importantes tareas de asesoramiento geotécnico para sucesivas ampliaciones de acerías y laminación de Dálmine-Siderca, Propulsora Siderúrgica, Sidercolor, Siderar, Sidor (Venezuela), Cinturón Ecológico Área Metropolitana, Planta YPF Ensenada, varias líneas de alta tensión en

Argentina, Paraguay y Uruguay, más los estudios y recomendaciones técnicas de cimentaciones para edificios en altura en Buenos Aires, grandes depósitos de combustible, gas licuado, agua, usinas térmicas, refinerías de petróleo y plantas petroquímicas.

Se destacan también sus tareas de asesoramiento durante los proyectos y la construcción de túneles en Quito (Ecuador), en el Cristo Redentor (Argentina), en los subterráneos de Buenos Aires (Techint, extensión línea B), el proyecto de fundaciones y asesoramiento general de ingeniería geotécnica durante el Proyecto OCP, en Ecuador, asesoramiento en el proyecto Camisea (Perú), en el proyecto de una refinería y muelle en Trinidad-Tobago, refinerías de Petrobrás (Brasil), así como asesoramiento para plantas en Bolivia.

Actuó también como asesor general en el proyecto Potasio Río Colorado para Vale, Argentina, como asesor de YPF para proyectos Bahía Blanca – Destilería La Plata (CPC – CPL-HTG) y asesor en otros proyectos de YPF.

Sin perjuicio de haber sido un estudioso en su especialidad, un brillante conferencista, un excelente docente universitario y un académico destacado, creemos que Eduardo Núñez hubiera deseado ser recordado como un ingeniero exitoso, un pionero de conocimientos científicos y tecnológicos aplicados a la solución de problemas geotécnicos de la más variada complejidad.

Con la partida de Eduardo Núñez, la ingeniería argentina y el espectro académico pierden no sólo un eminente componente de esos dos mundos, sino uno de los más respetados exponentes de una irrepetible época de la ingeniería argentina.

Raúl A. Lopardo

Dr. Mario Bunge (1919-2020)

El 24 de febrero de 2020 falleció en Montreal, Canadá, nuestro Académico Honorario Mario Bunge, físico, filósofo y epistemólogo, que se mantuvo activo hasta el final, con sus más de 100 años.

Mario había nacido en Buenos Aires en 1919 y llegó a ser un científico de una curiosidad insaciable y un férreo opositor a las seudociencias ampliamente reconocido a nivel global. Estudió en el Colegio Nacional de Buenos Aires donde no se distinguió por ser un buen alumno, para luego inscribirse en 1938 en la Universidad Nacional de La Plata. Influenciado por su padre estudió química durante un año, para luego dejarla y dedicarse a la física. Volvió a la Manzana de Las Luces para continuar finalmente sus estudios de Física en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, egresando como doctor en Ciencias Físico-Matemáticas en 1952. Su tesis versó sobre "Interpretación del átomo de hidrógeno en la teoría de Dirac", donde rescata la mecánica cuántica relativista para electrones de Paul Dirac, publicada a principios de 1928, hoy considerada como uno de los grandes hitos de la historia de la física.

Fue también profesor de Física Teórica en los llamados "años de oro" de esta institución desde 1956 a 1958, así como en la Facultad de Filosofía, donde dictó Filosofía de la Ciencia de 1957 a 1962. Fue parte de una legión de jóvenes brillantes, que en esos años los vemos compartiendo mesas redondas en Exactas con Osvaldo Reig y otros docentes, destacándose por su estilo provocativo que inspiró a toda una generación de científicos.



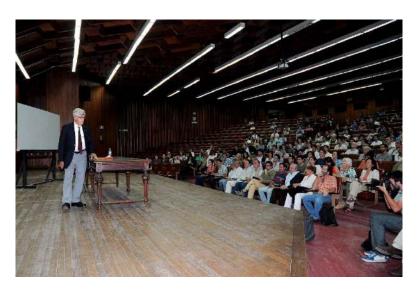
Mario Bunge en 2012, en su última visita a la Facultad de Ciencias Exactas.

Sin embargo, su verdadera dimensión científica se aprecia en sus estudios, conferencias y publicaciones sobre Filosofía y Epistemología,

disciplinas que estudiaría por su cuenta para alcanzar la meta que se había propuesto: "filosofar a la luz de la ciencia". En 1944 funda su primera revista filosófica, en colaboración con Risieri Frondizi, "Minerva, Revista Continental de Filosofía" donde sienta las bases de su epistemología. Su actividad en esos años es intensa, crea la Universidad Obrera, que llegó a tener 3.000 estudiantes, enseña en la Universidad Nacional de La Plata, va preso por antiperonista en 1951, y años después reconoce que "tampoco entendí al peronismo, simplemente porque el peronismo atacó a los universitarios y a las universidades, y yo tomé la defensa de eso. Fui gorila. Lo confieso con toda vergüenza" (La Nación Revista, 2019).

Inicia un exilio en 1962 que se fue prolongando en Estados Unidos (1963-1965), en Alemania (1965-1966) y en Canadá, donde vivió y enseñó en sus últimos 50 años. Ha sido profesor de Filosofía en la *McGill University* de Montreal desde 1962 hasta su retiro. Sus publicaciones llegan a medio millar, y sus libros, algunos clásicos traducidos a varios idiomas, son más de 80. Su sistema filosófico está expuesto en los ocho volúmenes que integran su Tratado de Filosofía Básica. Ha recibido más de 20 doctorados Honoris Causa de universidades americanas y europeas, incluyendo la Universidad Nacional de La Plata. Ha sido galardonado con el Premio Príncipe de Asturias de Humanidades en 1982, y ha sido miembro de diferentes academias de ciencias alrededor del mundo.

En su visita de 2012 a Exactas nos habló en su última clase en el Aula Magna de las seudociencias, y a pesar de sus más de 90 años con una prosa ágil e incisiva nos mostraba con sus ironías su descrédito hacia el sicoanálisis y a ciertas reflexiones faltas de razón alguna. Habló casi una hora de pie y sin papel ni apoyo audiovisual alguno, recibiendo una ovación de varios minutos de un auditorio altamente impresionado por sus enseñanzas.



Su última clase en el Aula Magna de Exactas en 2012.

En nuestra Academia, en el acto de incorporación, nos habló de "El efecto Bohm-Aharonov", fenómeno cuántico en el que la presencia de un campo magnético altera la propagación de una carga eléctrica, incluso cuando ésta se propaga en zonas donde dicho campo no está presente.

Se ha ido un gran maestro, un pionero de avanzada en la Filosofía de la Ciencias, dejando atrás una amplísima producción científica, y como deferencia a la institución donde se formara, ha donado su archivo personal a un fondo documental que se ha creado en la biblioteca digital de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (http://digital-old.bl.fcen.uba.ar/gsdl-282/cgi-bin/library.cgi?p=FondoBunge). Allí están atesoradas sus notas periodísticas desde 1956 a 2009, junto a otras publicaciones y notas personales, incluyendo separatas y pruebas de galera, de acceso abierto e inmediato a los documentos, para todos los interesados en su estudio.

Víctor A. Ramos

Dr. Antonio Blanco (1929-2020)

El 23 de abril de 2020 falleció nuestro Académico Correspondiente Antonio Blanco.

El Dr. Blanco, médico cirujano y Doctor en Medicina de la Universidad Nacional de Córdoba, fue Profesor Titular de la Cátedra de Química Biológica de la Facultad de Ciencias Médicas de esa Universidad desde 1965 hasta 1996, año en el cual fue designado Profesor Emérito. Desde 1961 hasta 1965 se desempeñó como "Research Associate" en la Escuela de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, de Baltimore, Estados Unidos. Fue miembro de la Carrera del Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), donde alcanzó la categoría de Investigador Superior.



Dr. Antonio Blanco

El Dr. Blanco publicó seis libros de texto destinados a estudiantes universitarios y más de ciento veinte artículos de investigación original en revistas internacionales. Entre ellos, sin duda el libro "Química Biológica", con 10 ediciones, incluyendo la traducida al inglés y publicada por Elsevier en 2017, ha sido el material de estudio de miles de estudiantes universitarios de todo el mundo y queda como un testimonio más de su brillante calidad docente y dentífica.

El Dr. Blanco fue miembro de la Academia Nacional de Ciencias (desde 1985), de la Academia de Ciencias Médicas de Córdoba, y Presidente de la Sociedad de Biología de Córdoba en dos períodos.

Demetrio Boltovskov

Anales de la Academia	Nacional de Ciencias	Exactas, Físicas y Naturales	(Argentina), Tomo 72, 2021

RECONOCIMIENTOS

Doctorado Honoris Causa otorgado a la Dra. Alicia Dickenstein

La Académica Titular Alicia Dickenstein fue distinguida con un Doctorado Honoris Causa 2020 del Royal Institute of Technology (KTH), Suecia.

El texto de su nominación ha sido el siguiente:

"Alicia Dickenstein is a famous mathematician within the areas of algebraic geometry and combinatorics. Recently she has also been involved in applications within biochemistry. Among many prestigious awards and honors, it deserves mentioning that she has been the Vice President of the International Mathematical Union and become both fellow of AMS and SIAM fellow. She has visited Sweden and KTH extended periods twice, first as a visiting professor connected to the Mittag Leffler Institute in 2011 and then as a Wallenberg Visiting Professor in 2017."

La Fundación sueca Kurt and Alice Wallenberg, que financió luego de una selección muy competitiva la posición mencionada de Visiting Professor de la Dra. Dickenstein, fue establecida en 1917 y desde entonces ha dado subsidios y premios a la investigación básica de excelencia en Suecia.

El Royal Institute of Technology es la universidad técnica más grande y respetada de Suecia. Desde su fundación en 1827, ha estado en el centro de los avances tecnológicos en Suecia. Su sólida reputación en investigación ha reforzado la posición de la universidad como una de las universidades técnicas más destacadas de Europa.

Este es el Primer Doctorado Honorario que se otorga a un Investigador Latinoamericano.

Dr. Víctor Yohai

PREMIOS "Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales"

La Academia, en su sesión plenaria realizada el 25 de Septiembre de 2020, de acuerdo con las propuestas recibidas por las diferentes Secciones y teniendo presente los resultados de las votaciones secretas de sus Miembros Titulares, decide otorgar por unanimidad los siguientes premios a los candidatos seleccionados. El acto de entrega correspondiente tuvo lugar el 27 de noviembre de 2020 (https://www.youtube.com/watch?v=fZdcbsFYFrw).

APERTURA DEL ACTO DE ENTREGA DE PREMIOS

Buenas tardes a todos y todas.

Agradecemos la presencia del Dr. Juan Reboreda, Decano de la Facultd de Ciencias Exactas y Naturales, a los señores académicos y al público en general que nos sigue en las diferentes plataformas.

Hoy la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales realiza uno de los actos académicos más gratos para la institución, como es el premiar a destacados científicos argentinos, los que han sido seleccionados a través de un arduo y riguroso trabajo realizado por distintas comisiones de la Academia. Los candidatos han sido propuestos por diferentes instituciones del país a las que estamos agradecidos por el celo y la responsabilidad demostrada en la elección de los potenciales candidatos.

En este acto por primera vez vamos a entregar los premios en forma virtual debido a las condiciones de Distanciamiento Social Preventivo y Obligatorio (DISPO) que son de dominio público, lamentando no poder recibir con un caluroso abrazo a los premiados. Sin embargo, este hecho tiene algunas ventajas, y es que podemos abrirlo al mundo sin restricciones y compartir con todos los interesados este emotivo acto.

Deseo agradecer públicamente a las autoridades de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires el habernos permitido compartir la plataforma Zoom de la institución. Esto tiene para nosotros un significado doblemente estimulante. Primero por la excelencia y calidad de esta institución que nos prestigia por la confianza de brindarnos su canal de comunicación, y segundo, porque nos retrotrae a los orígenes de nuestra Academia. Como ustedes saben el primer presidente y fundador de esta Academia fue el rector Juan María Gutiérrez en 1874. Este hecho marcó a nuestra institución, que tuvo como sede física de la Academia, desde 1874 a 1957, las dependencias de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, hoy día llamada Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. La academia funcionó en la histórica Manzana de las Luces por más de 80 años, más de la mitad de su vida, compartiendo sus miembros las tareas académicas con la de docencia, marcando una estrecha colaboración entre las dos instituciones que perdura hasta nuestros días. Este retorno virtual a los orígenes de la Academia me permite hacer una breve síntesis del rol de la Academia en la promoción del conocimiento científico y su relación con la sociedad.

Desde sus orígenes, la Academia se privilegió con la incorporación de prestigiosos científicos, seleccionados entre los más prominentes de las

diferentes disciplinas, destacándose entre ellos el Doctor Luis Federico Leloir, quien ocupara importantes tareas de gestión en nuestra institución antes de ser laureado con el Premio Nobel. También pasó por esta academia otro Premio Nobel, el Dr. César Milstein y toda una pléyade de ilustres científicos que sería muy largo enumerar.

Sus miembros son elegidos por la propia Academia, sin intervención externa, en mérito a sus destacados aportes en la disciplina y sus virtudes personales. Esto hace a las Academias, organizaciones reconocidas por su jerarquía científica y su independencia respecto del gobierno, partidos políticos o corporaciones de cualquier tipo. Esta tarea de seleccionar e incorporar a prestigiosos hombres de ciencia a las tareas de nuestra academia garantiza a través de los años la excelencia e independencia de sus resoluciones y recomendaciones.

La Academia integra el Consejo Interacadémico que reúne a las 22 academias nacionales, que todos los años se reúnen y analizan los problemas prioritarios para el país y en forma conjunta selecciona los temas más relevantes para la publicación de un documento conjunto. Este año correspondiendo a los problemas que enfrenta la sociedad el tema fue "Pandemia. Los múltiples desafíos que el presente le plantea al porvenir". Este documento enfoca de muy distintos ángulos la Pandemia de COVID-19, desde el derecho, la medicina, la sociología, la arquitectura, las ciencias exactas y naturales, el medio ambiente, etc., con interesantes análisis de la experiencia recogida y las iniciativas para el futuro. Los diferentes informes fueron compilados en un libro que ya está impreso, en papel y en forma digital y será presentado públicamente la semana que viene.

Nuestra Academia participa activamente en la Red Interamericana de Academias de Ciencias (IANAS) que tiene como principales objetivos focales el fortalecimiento de las capacidades (capacity-building) de la comunidad científica y la sociedad en general en los respectivos países a través de cursos y reuniones científicas y de actividades de divulgación de la ciencia; además tiene un programa sobre el problema del agua en la región (water-program), otro sobre el rol de la mujer en la ciencia (women-for-science-program), uno sobre energía con énfasis en las renovables (energy-program) y finalmente uno muy activo sobre educación en ciencia (science-education-program). Estas iniciativas son a nivel continental priorizando las subregiones más vulnerables o con mayores problemas.

Además, nuestra Academia es la representante del país en "Science 20" (S20), que representa a las Academias Nacionales de Ciencias de las naciones del G20, que reúne a las principales economías del mundo, representadas por estos países. El G20 debe tener la previsión necesaria para aliviar las perturbaciones económicas y sociales que puedan devenir en el futuro, como por ejemplo la que traería una próxima pandemia u otros eventuales

problemas críticos futuros. Hemos trabajado en este último año en los problemas del COVID-19, a nivel planetario y de las personas, que deben verse de manera integral y con plena apreciación de su complejidad e interconexión. Los resultados obtenidos han sido entregados a las autoridades de cada país del G20. Las conclusiones alcanzadas indican la necesidad global de estar preparados para una colaboración internacional no sólo en la actual pandemia, sino para promover investigaciones, monitorear y responder rápidamente a las enfermedades emergentes de pandemias futuras. Las conclusiones y recomendaciones están disponibles en la página web de la Academia. Nuestras recomendaciones fueron discutidas la semana pasada en la reunión virtual plenaria de los presidentes del G20 y estamos halagados que fueran una de las principales recomendaciones de la reunión que se hicieron públicas a través de los distintos medios.

La Academia participa en el análisis de diversos problemas que requieren una opinión científica y técnica bien fundamentada, como han sido las implicancias de la reciente Ley de los Glaciares y el medio ambiente. Actualmente está trabajando con un grupo de expertos de las más diferentes instituciones y empresas sobre "Residuos plásticos: su impacto en la salud humana, el ambiente natural y los ecosistemas", reuniendo las conclusiones en un libro ya terminado y editado para concientizar de la acuciante contaminación de los océanos y las costas con estos residuos. Estos libros producidos por la Academia tienen amplia difusión, no sólo en ámbitos específicos del gobierno, sino que se ponen a disposición de toda la sociedad en forma gratuita.

Otra actividad que viene desde hace años realizando la Academia es el otorgamiento de becas. Por donación de la Ing. Irma Mastronardi en el año 2000 se ofrecen las becas "In libris Carpe Rosam" en Matemáticas y en Ciencias Biológicas para estudiantes con dedicación exclusiva menores de 22 años en las áreas mencionadas en la Universidad de Buenos Aires. Es importante destacar que el monto de estas becas corresponde a una indemnización que le pagó el estado a la familia por la desaparición forzada de sus dos hijos, Paulo y Marcelo, estudiantes de esas carreras. Además, la Academia ofrece becas para llevar a cabo trabajos postdoctorales en el Instituto de Investigaciones Bioquímicas de La Plata, solventadas por una donación del académico Dr. Rodolfo Brenner en 2017, antes de su fallecimiento. Ambas han tenido y tienen una amplia aceptación.

A su vez la Academia trata de comunicarse con la sociedad a través de los cafés científicos que realizamos en el Café Tortoni, un ciclo conducido por la periodista científica Nora Bär que lleva ya varios años de éxito y que ha tratado los más diversos problemas en distintas disciplinas, con una buena acogida del público. Con el inicio de la pandemia han pasado a ser virtuales, y vienen realizándose en conjunto con el C3 del Ministerio de Ciencia y Tecnología. La semana pasada en estos "Encuentros con la Academia" se trató

el tema "¿Un océano descartable? ¿Hasta dónde llegará la contaminación por plásticos?", donde con gran participación del público hemos discutido sobre la salud de los océanos fuertemente impactados por la contaminación. Esta actividad contribuye a concientizar de estos problemas a la sociedad.

Sin embargo, una de las actividades más gratas de la Academia es reconocer a jóvenes científicos que se destacan por el resultado de sus investigaciones, por el impacto que producen en las distintas disciplinas y que permiten visualizar el activo presente de nuestra ciencia que nos augura un mejor porvenir.

Por otra parte, es importante reconocer también aquellos que han dedicado toda una vida al progreso de la ciencia, no sólo para mostrarles nuestro afecto, sino para que estos premios a los consagrados sirvan de ejemplo para las nuevas generaciones.

Víctor A. Ramos Presidente

PREMIOS CONSAGRACIÓN



En Ciencias de la Ingeniería: Dra. Silvia Nair Goyanes Laboratorio de Polímeros y Materiales compuestos y del grupo de Nanomateriales Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires



En Matemática: Dr. Guillermo Horacio Cortiñas Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires



En Ciencias Químicas: Dr. Ernesto Julio Calvo Departamento de Química Inorgánica, Analítica y Química Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires - CONICET

PREMIO EN INNOVACIÓN TECNOLÓGICA



Ing. Alberto Francisco Martín Ghiselli y equipo, proyecto ARAS Grupo EECE, Departamento ENDE, CNEA

PREMIOS ESTÍMULO



En Ciencias de la Ingeniería: Dr. Enzo Ferrante Instituto De Investigación en Señales, Sistemas e Inteligencia Computacional, Centro Científico Tecnológico CONICET - Santa Fe; Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral



En Matemática "Dr. Eduardo Zarantonello": Dr. Emilio Lauret
Instituto de Matemática de Bahía Blanca (INMABB),
Universidad Nacional de Sur - CONICET



En Física "Dr. Mario Bunge": Dr. Gonzalo Torroba Comisión Nacional de Energía Atómica



En Astronomía "Dr. Jorge Sahade": Dr. Carlos Argüelles Área Física Teórica, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata



En Ciencias Biológicas: Dr. Esteban Avigliano Instituto de Investigaciones en Producción Animal (INPA-UBA-CONICET), Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad de Buenos Aires



En Ciencias la Tierra: Dr. Ramiro Ignacio Saurral Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (UBA-CONICET); Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires



En Ciencias Químicas: Dra. María Belén Blanco Departamento de Fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Córdoba

Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Argentina), Tomo 72, 2021

PRESENTACIONES DE LOS PREMIADOS

Presentación de Silvia Nair Goyanes

Buenas tardes. Para mí es un honor y un placer presentar este premio y en este sentido quiero agradecer al presidente de nuestra sección ingeniería Dr. Ing. Raul Lopardo quien, muy generosamente y ante mi requerimiento, me cedió el lugar que le hubiera correspondido a él.

Silvia Goyanes es Investigadora Superior del CONICET y Profesora Titular del Departamento de Física-FCEyN-UBA. Publicó más de 130 artículos en revistas indizadas. Co-autora de 17 capítulos de libro y editora de 1 libro para Springer. Ha dirigido 12 tesis doctorales y actualmente dirige otras 5. Muchos de los tesistas se insertaron en industrias o en centros tecnológicos. Presentó 9 patentes, en Argentina, en EEUU, México y España. 2 de las patentes son con empresas. 4 de ellas, ya fueron aceptadas. Fue asesora de YPF-Tecnologías durante 2 años, tiene convenios con empresas y con el INTI; ha recibido varios premios entre ellos L'Oreal-Unesco nacional, el premio Domingo Faustino Sarmiento del Senado de la Nación Argentina por sus desarrollos para mejorar la calidad de vida de la población, Premio Ada Byron 2020 a la mujer tecnóloga.

Sus principales áreas de investigación son los materiales poliméricos, nanomateriales y materiales biodegradables. Ella y su equipo desarrollaron el material bioactivo del barbijo que hoy se comercializa en Argentina, que yo uso y recomiendo. Quisiera destacar que Silvia, más allá de sus sobrados antecedentes científicos, en realidad es una tecnóloga de vocación con un destacable espíritu emprendedor, pensando permanentemente en nuevas aplicaciones de los materiales que desarrolla en el laboratorio, convencida de la importancia de la transferencia de conocimientos al medio socioproductivo.

Por todo lo expuesto, la Academia ha considerado que tiene los méritos más que suficientes para recibir el premio Consagración de la Sección de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología. En nombre de toda la Academia, felicitaciones Dra. Goyanes.

Miguel A. Laborde

Presentación de Ernesto Julio Calvo

Ernesto Calvo es Licenciado en Ciencias Químicas (orientación Fisicoquímica) por la Universidad de Buenos Aires (1975) y Doctor en Ciencias Químicas (orientación Fisicoquímica) por la Universidad Nacional de La Plata (1979). Formación posdoctoral en el *Imperial College of Science and Technology* (Reino Unido) como *Postdoctoral Research Fellow* en Química y en Ciencia de los Materiales entre 1979 y1982. Fue después *Senior Research Associate* en el Departamento de Química y el *CASE Center for Electrochemistry* en la *Case Western Reserve University*, Cleveland, EE.UU. (1983-1984).

A su regreso al país, después de un período en el INTI, se incorporó al Departamento de Química Inorgánica, Analítica y Química Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, donde realizó sus actividades hasta la actualidad. Recorrió todos los peldaños de la docencia universitaria, y es actualmente Profesor Titular Regular (desde 1997). En esa institución realizó importantes tareas de gestión, entre las que se destaca la dirección del Departamento (1997), la Secretaría Académica de la Facultad (1998-2002) y la dirección del instituto de doble dependencia UBA-CONICET, el INQUIMAE (2008-2019). También fue Vicepresidente de la Sociedad Internacional de Electroquímica (2009-2011).

El Dr. Ernesto Calvo ha sido pionero en una gran diversidad de temas y aportado a nivel internacional en cada uno de ellos: electroquímica de estado sólido, autoensamblado molecular, bioelectrónica, tecnología de beneficio de litio, etc. El impacto internacional de su actividad se pone de manifiesto en los convenios internacionales que suscribió: F. Nart (Brasil, Fundación Antorchas), P.N. Bartlett (Reino Unido, British Council, Fundación Antorchas), M. Stratmann (Alemania, Fundación Volkswagen), W. Schuhmann (Univ. Bochum, Alemania –DAAD/PROALAR), P.N. Bartlett, Wellcome Trust (2002-2005).

Muy relevante ha sido su aporte a la creación de la comunidad de nanotecnología en Argentina, la que ha liderado en las primeras dos décadas de este siglo, basada en tres pilares fundamentales: su energía inagotable para generar proyectos de equipamiento, la creación de redes nacionales e internacionales mediante escuelas e intercambios, y la inclusión de la industria. El resultado fue la creación de una comunidad muy activa. En particular, esto concluyó en proyectos como el FSNANO 2010, en el que se terminó desarrollando una interesante planta piloto electroquímica en la empresa Laring que permite fabricar materiales ópticos nanoestructurados.

Ha publicado hasta el presente alrededor de 180 artículos científicos originales, la mayoría de ellos en revistas de excelente nivel internacional, además de numerosos capítulos de libros. Su índice h es 51, y su número de

citaciones 10.252 (según *Google Scholar*). También ha sido miembro de los cuerpos editoriales de diversas publicaciones internacionales y de EUDEBA.

Su tarea de formación de discípulos es también extensa, y destacable además por la trayectoria posterior de quienes dirigió. Acredita la dirección de 20 Tesis Doctorales ya completadas y de cuatro en curso. Sus discípulos están en posiciones reconocidas en la academia y en la industria; tres de sus discípulos son actualmente Investigadores Principales de CONICET, y otros dos son integrantes del Centro de Investigación y Desarrollo en Materiales Avanzados y Almacenamiento de la Energía de Jujuy.

Entre las distinciones y reconocimientos recibidos, cabe mencionar el Diploma al Mérito Konex (2003), su designación como *Fellow* de la Royal Society of Chemistry (2005), Académico de la Academia de Ciencias de América Latina (ACAL, 2017) y el Premio *Bright Minds Challenge* (2017, Amsterdam) por su proyecto "Sustainable electro-chemical extraction of lithium using solar radiation".

En síntesis, el Dr. Ernesto Julio Calvo reúne con creces los méritos para hacerse acreedor del Premio Consagración en Ciencias Químicas de esta Academia.

Miguel A. Blesa

Presentación de Guillermo Cortiñas

Guillermo Cortiñas se doctoró en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires en el año 1982 y desde entonces desarrolla una extraordinaria carrera matemática.

Su labor científica se ha centrado en la K-teoría y en la homología cíclica, áreas en las cuales ha realizado contribuciones fundamentales. Es el único matemático argentino que ha publicado artículos en todas las revistas más prestigiosas de matemática.

No llama entonces la atención el reconocimiento de la comunidad matemática internacional a su trabajo, que se manifiesta por ejemplo en el otorgamiento del Humboldt Research Award en 2016, en la invitación como Plenary Speaker del Congreso Latinoamericano de Matemáticos CLAM2012 y en la excepcional invitación como orador en la Sesión de Algebra del Congreso Internacional de Matemáticos ICM2014 (uno de los muy contados argentinos que han logrado tal distinción). También, en el ambiente nacional fue invitado por la Unión Matemática Argentina a presentar la Conferencia de Clausura González Domínguez en 2009 y la Conferencia Inaugural Rey Pastor en la Reunión Anual 2014.

Pero Guillermo Cortiñas no se limita a producir artículos científicos sino que también sirve a la profesión desde distintas y destacadas tareas ejecutivas y consultivas. En el plano internacional, subrayamos la presidencia desde 2017 de la Unión Matemática de América Latina y el Caribe (UMALCA) y la presidencia del Panel de Álgebra del ICM2018, y en el plano local, la vicedirección del Instituto de Investigaciones Matemáticas Luis A. Santaló (IMAS) desde 2019.

El Dr. Cortiñas ha desarrollado asimismo una importante tarea de formación de recursos humanos y es un dedicado docente. Me consta que todo lo que hace, lo hace con gran dedicación y poniendo todas sus energías.

Estamos muy contentos desde la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de otorgarle este merecido reconocimiento a su extraordinaria trayectoria nacional e internacional y a su destacada tarea de servicio a la profesión.

Alicia Dickenstein

Presentación de Alberto Ghiselli (Proyecto ARAS)

Buenas tardes Tengo el agrado presentar al proyecto seleccionado como ganador del Premio a la Innovación Tecnológica.

Se trata del (Antena Radar de Apertura Sintética). Son las antenas de los satélites puestos en órbita en el marco del Proyecto SAOCOM de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).

El proyecto fue desarrollado en el Centro Atómico Constituyentes de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) por un grupo de 70 profesionales y técnicos de distintos Departamentos, y Gerencias, bajo la dirección del Ing. Alberto Ghiselli. Ellos diseñaron, y construyeron la antena, que fue probada exitosamente con los lanzamientos del 2018 y de hace unos meses.

No entraré en más detalles sobre el proyecto, ya que es mucho mejor dejar esa descripción a cargo del Ing Ghiselli.

Sí me parece oportuno destacar la relevancia que la Academia da a este premio. Tiene como objetivo reconocer aportes de la ciencia y la tecnología a la sociedad.

Mucho hemos hablado esta tarde de ese rol fundamental que los científicos cumplen siendo un motor fundamental para el desarrollo del país, esto es posible, claro está, dentro de un marco que tenga como objetivo el desarrollo del país.

Como en otros años, la comisión encargada de la evaluación de los postulantes al premio tuvo realmente una ardua labor, ya que se presentaron varios postulantes con aportes relevantes.

Esta vez el premio recayó en un equipo de la Comisión Nacional de Energía Atómica, sin duda una institución pionera en la transferencia de ciencia y tecnología al país en muchos ámbitos: la medicina, la industria nacional y, en este caso, el proyecto de los satélites. Esa transferencia derramó mucho más allá de las aplicaciones exclusivamente nucleares.

Felicitaciones al equipo y al Ing. Ghiselli , al que dejo en uso de la palabra.

Teresa Pérez

Presentación de Emilio Lauret

Emilio es un joven matemático que trabaja, en temas emergentes de gran relevancia en la matemática contemporánea. Su investigación se centra en problemas de geometría espectral, representaciones de grupos de Lie compactos y sus aplicaciones.

Hizo su licenciatura y doctorado en la Universidad Nacional de Córdoba. Actualmente, es Investigador Adjunto del CONICET y Profesor Adjunto en la Universidad Nacional del Sur.

Recibió dos importantes distinciones: una Oberwolfach Leibniz Fellowship entre 2013 y 2014 y una Fellowship de la Fundación Alexander von Humboldt entre 2017 y 2018 con la que visitó la Universidad Humboldt de Berlin. Desde Alemania trajo una nueva línea de investigación inexistente en el país: el estudio de problemas directos en geometría espectral.

Los aportes científicos de Emilio han tenido un impacto significativo debido a su originalidad, profundidad y relevancia, colocándolo a nivel internacional como un destacado joven investigador en el área de la geometría espectral. Logró resolver problemas en dicha área que estaban abiertos o para los que había pocos resultados y en casos muy particulares.

Su carrera impresiona tanto por la calidad de sus contribuciones como por la diversidad de temas que ha abordado. Además de haber trabajado con colaboradores de distintos lugares es notable su autonomía que se ve reflejada en el alto porcentaje de publicaciones de su única autoría, lo cual es inusual en un matemático a esta altura de su carrera.

La labor de Emilio no se limita sólo a las tareas de investigación ya que las complementa con una activa tarea docente y de promoción de la ciencia. En particular, estuvo estrechamente involucrado con la organización de la Reunión Anual de la Unión Matemática Argentina este año con más de 800 participantes, que se hizo en forma virtual debido a la pandemia.

En resumen, Emilio Lauret es un joven matemático con una trayectoria de investigación destacable, gran autonomía y muy interesado en colaborar con la comunidad en la que se desempeña. Por estas razones, es un placer presentarlo como ganador del Premio Estímulo en Matemática "Dr. Eduardo Zarantonello".

Graciela Boente

Presentación de Gonzalo Torroba

Es para mí un gran placer presentar al Dr. Gonzalo Torroba a quien se le entrega el Premio Estímulo en Física, que otorga la Academia Nacional de Ciencias Físicas y naturales, premio que este año lleva el nombre de Mario Bunge quien fuera un físico y filósofo argentino muy destacado a nivel internacional.

El Dr. Torroba tiene 40 años, es oriundo de Santa Rosa, La Pampa, donde realizó sus primeros estudios universitarios. Egresó como Licenciado y obtuvo la Maestria en Fisica en el Instituto Balseiro. Recibió el Premio Guido Beck de esa Institución al mejor promedio del año 2003. Posteriormente realizó su Doctorado en Física en la universidad de Rutgers en Estados Unidos. Su tema de tesis verso sobre la dinamica en cuatro dimensiones en cuerdas compactificadas. Realiza dos posdoctorados, uno en el reconocido laboratorio SLAC (California Stanford Linear Accelerator) y luego otro en el Departamento de Física de la Univesidad de Stanford. De regreso al pais en el 2014 se incorpora como investigador adjunto del CONICET al prestigioso grupo de Física de Partículas del Centro Atómico Bariloche donde actualmente trabaja. En el campo docente es Jefe de Trabajos Prácticos.

El Dr. Torroba es un físico teórico en las áreas de física de altas energías materia condensada, y cosmología. Sus trabajos de investigaciones están plasmados en aproximadamente 70 publicaciones en revistas internacionales de excelencia y estos trabajos han tenido un reconocido impacto en la comunidad científica a la que fueron dirigidos.

Para finalizar debemos agregar que dentro de los reconocimientos que ha recibido, en el año 2017 fue galardonado con el Premio Estimulo a Jóvenes Científicos otorgado por la Fundación Bunge y Born.

Felicito entonces muy calurosamente al Dr. Gonzalo Torroba por el premio que le otorga nuestra Academia.

Huner Franchiotti

Presentación de Carlos Argüelles

El premio estímulo Dr. Jorge Sahade, que hoy recibe el Dr. Carlos Argüelles, conlleva un significado relevante para alguien egresado de la Universidad Nacional de La Plata. El Dr. Sahade, uno de los astrónomos más importantes de Argentina, se graduó en dicha Universidad cuando apenas comenzaba la carrera de astronomía, fue el primer decano de su Facultad de Ciencias Exactas, así como el primer premiado en la categoría Astronomía por esta Academia.

Nuestro premiado, el Dr. Carlos Arguelles, se graduó en 2010 como Licenciado en Astronomía en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Viajó luego becado a Italia, donde en 2014 obtuvo el Doctorado en Física y Astrofísica en la Universidad "La Sapienza" de Roma. Realizó una estadía post-doctoral en el International Center for Relativistic Astrophysics, regresando luego a Argentina para una segunda estadía post-doctoral con beca de CONICET.

En la actualidad se desempeña como Investigador Adjunto de CONICET en el área de astrofísica teórica en la FCAG. Desde 2016 es docente en la Facultad de Ciencias Exactas de la UNLP.

Es colaborador externo de la Red International Center for Relativistic Astrophysics, manteniendo fructíferas colaboraciones con investigadores de Italia. España, Colombia, Bielorrusia, Inglaterra y de la Universidad de Buenos Aires en Argentina.

Su tema de investigación central está en la interfaz entre la Astrofísica y la Física de partículas. Específicamente, el Dr. Arguelles ha trabajado en el estudio de la materia oscura, en el análisis de su naturaleza y su distribución a escalas galácticas y extragalácticas, tanto desde el punto de vista teórico como a través de la confrontación con datos observacionales provenientes de telescopios ópticos e infrarrojos. Así ha podido realizar predicciones para halos galácticos de materia oscura que aportan soluciones alternativas a diversas tensiones que afronta el paradigma cosmológico estándar en escalas galácticas.

Publica en revistas internacionales de alto impacto, tanto del área de física como de astronomía. Un artículo original encabezado por el Dr. Arguelles sobre el rol de la materia oscura en galaxias y su relación con la física de partículas elementales fue distinguido en 2019 con el premio que otorga anualmente la Gravity Research Foundation de EEUU. La obtención de tal distinción le valió, además, un reconocimiento de la Cámara de Diputados de la Prov. de Buenos Aires.

Ha codirigido dos tesis de Licenciatura de la UBA y se encuentra actualmente dirigiendo otros dos estudiantes de la Universidad de La Plata.

En síntesis, es un joven investigador que aborda temas de estudio de frontera con una producción original de alta calidad, reconocida por expertos internacionales.

Por lo expuesto, esta Academia considera que el Dr. Carlos Argüelles es un excelente candidato para recibir el Premio Estímulo de Astronomía 2020 "Dr. Jorge Sahade".

Cristina Mandrini

Presentación de Enzo Ferrante

La Academia recibió ocho excelentes propuestas para este premio. Tras el análisis realizado, los integrantes de la Sección propusieron que el Premio Estimulo en Ciencias de la Ingeniería del año 2020 sea otorgado al Ingeniero Doctor Enzo Ferrante.

Enzo FERRANTE obtuvo en el año 2012 su diploma en Ingeniería de Sistemas como brillante alumno de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, con sede en Tandil, habiendo ya realizado previamente una beca semestral de investigación en el INRIA de Grenoble, Francia.

En el año 2012 comenzó su doctorado en la École Doctorale Sciences et Technologie de l'Information et de la Communication de la Université de París-Sarclay, Francia, desarrollando métodos de optimización discreta y modelos de grafos probabilísticos para el registro de imágenes biomédicas, alcanzando el grado de doctor con "mención muy honorable y felicitaciones del jurado" en 2016. Simultáneamente, durante esa etapa fue alumno visitante de la Universidad de Stanford en Estados Unidos. En su tesis doctoral propuso nuevos métodos para fusionar modalidades de imágenes médicas como las tomografías computadas en tres dimensiones con las ecografías (bidimensionales). Los aportes de su tesis fueron publicados en once artículos (cinco en journals internacionales de alto impacto, cuatro prestigiosas conferencias internacionales, dos workshops internacionales y una patente internacional).

Realizó su posdoctorado en el Biomedical Image Analysis Group del Imperial College de Londres, Inglaterra, esta etapa se especializó en modelos de inteligencia artificial para el análisis de imágenes médicas, y formó parte del grupo que obtuvo el primer lugar en la competencia internacional de segmentación de tumores cerebrales (BRATS 2017) utilizando su método EMMA (Ensemble of Multiple Models and Architecture).

Al finalizar en 2017 su posdoctorado, ingresó como investigador repatriado del CONICET y volvió a la Argentina para radicarse en el Instituto de Señales, Sistemas e Inteligencia Computacional (CONICET-UNL) en la ciudad de Santa Fe, creando una nueva línea de investigación sobre "aprendizaje profundo" (deep learning) para análisis de imágenes biomédicas, recibiendo un importante subsidio de AXA Research Fund y habiendo a la fecha formado un grupo de investigación propio. Sus trabajos científicos han sido citados en más de 1.400 publicaciones y posee un índice H de 13, lo que inusualmente elevado para un investigador de sólo 32 años. Además de sus sobresalientes antecedentes académicos, sus investigaciones se han traducido en innovación local, pues desde 2018 participa como consultor de la start-up

argentina EntelAl para el desarrollo de software para neuroimágenes con destino al Hospital FLENI de Buenos Aires.

El Ing. Dr. Ferrantes es ya un científico destacado, pero además la Sección de Ciencias de la Ingeniería ha considerado para proponerlo al premio "Estímulo" por su notable potencial para lograr importantes aportes futuros a la ciencia local e internacional y su compromiso con el sistema científico argentino.

Raúl Lopardo

Presentación de María Belén Blanco

La Dra. María Belén Blanco egresó como Licenciada en Bioquímica de la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ), de la UNC en el año 2004 y obtuvo su Título de Doctora en Química en el Año 2009 en el tema "Cinética y Mecanismos de las reacciones de átomos y radicales de relevancia atmosférica utilizando cámaras de simulación y sistemas dinámicos". Durante su doctorado, la investigadora realizó una pasantía de tres meses en el Depto. de Química Física de la Universidad de Wuppertal, Alemania (2007). Su gran entusiasmo y dedicación a la investigación la llevó a obtener excelentes resultados en un corto período de tiempo, realizando 15 publicaciones científicas en revistas de alto prestigio e impacto internacional y un capítulo de libro (NATO 2008).

Al finalizar sus estudios doctorales, María Belén obtuvo una beca posdoctoral "Georg Forster" de la "Fundación Alexander von Humboldt" de Alemania, con la que realizó una estadía posdoctoral de dos años (2010-2012) en la Universidad de Wuppertal bajo la dirección del Prof. Dr. Peter Wiesen y del Dr. Ian Barnes. Durante su pos-doctorado con estos dos líderes mundiales en estudio de reacciones atmosféricas y medidas de la contaminación del aire, adquirió experiencia en el uso de diferentes fotoreactores con detección "in situ" por espectroscopia infrarroja (FTIR en cámaras de paso múltiple) en la determinación de los productos de reacciones complejas y la elucidación de los mecanismos de las reacciones troposféricas. En este período, obtuvo una prolífica producción científica de calidad en revistas internacionales de alto impacto como lo son: "Journal of Physical Chemistry A" v "Environmental Science & Technology" de la "American Chemical Society", amén de comunicaciones en diferentes congresos nacionales y del extranjero.

El regreso al país de la Dra. Blanco, en junio de 2012, se vio favorecido por la obtención de una Beca de Reinserción Posdoctoral del CONICET y por su ingreso a la Carrera del Investigador Científico, así como por la obtención de una beca y un subsidio de reinstalación otorgado por la Fundación Alexander von Humboldt. Desde su regreso colabora activamente en un grupo de investigación del INFIQC-CCT Córdoba, principalmente en la investigación orientada al estudio de los mecanismos de las reacciones de degradación de compuestos orgánicos volátiles (COVs) de interés en la química de la troposfera mediante diversas cámaras de simulación.

Después de su reinserción, obtuvo subsidios internacionales otorgados por la Fundación Alexander von Humboldt para compra de equipamiento mayor en 2013, 2016 y 2018 que le permitieron poner en funcionamiento un reactor alemán donado a la FCQ por la Universidad de Wuppertal. La instalación de este reactor permite actualmente a los alumnos de grado y posgrado de la FCQ utilizar técnicas modernas de alta complejidad para la

resolución de problemas específicos en el campo de la contaminación del aire. La Dra. Blanco se viene desarrollando como investigadora Independiente del CONICET realizando aportes científicos originales importantes en el área de la química atmosférica y ambiental, avalada por la divulgación de los resultados en numerosos congresos nacionales y en el extranjero, así como en la publicación de más de 50 trabajos en revistas internacionales de muy buen nivel. Posee además subsidios nacionales como SECyTUNC (2012-2014; 2014-2016, 2016-2018, para grupos consolidados "Consolidar tipo III 2019-2022") y dos subsidios de ANPCyT – FONCYT (B 2016-2018 y D 2019-2021).

Actualmente, dirige 3 tesis de doctorado, 1 investigadora asistente y 3 becas doctorales del CONICET, y como fruto de dichos trabajos exhibe una excelente producción científica.

Antes de terminar, quiero también destacar que MB también ha expresado una clara motivación por la docencia, siendo Profesora Adjunta por concurso en el Departamento de Fisicoquímica, y alcanzado la categoría II del Programa de Incentivos Docentes. Ha realizado docencia tanto en asignaturas de grado como en pregrado (Ciclo de Nivelación) y posgrado dictando numerosos cursos de posgrado y especialización en el país y en el extranjero. Esta amplitud de tareas enteramente voluntarias, muestra el genuino interés de María Belén por el ejercicio de la docencia a diferentes niveles. Además, realiza amplias actividades de divulgación en conjunto con el Ministerio de Educación de la Provincia de Córdoba y de gestión en el INFIQC, FCQ y en la Asociación Unida del Grupo de Montevideo (AUGM), como representante de la UNC.

En resumen, la Dra. Blanco no sólo ha realizado una notable contribución científica en temas de relevancia actual en el campo de la Química Ambiental y de las Ciencias de la Tierra, del Agua y la Atmósfera, sino que además une a su capacidad intelectual un espíritu emprendedor y decidido, que la distingue claramente entre los jóvenes científicos del país.

Norma Sbarbati Nudelman

Presentación de Ramiro Saurral

Es un gusto para mí presentar al ganador del Premio Estímulo en Ciencias de la Tierra, Ramiro Saurral. Ramiro es Licenciado en Ciencias de la Atmósfera de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA. En 2007 egresó con Diploma de Honor de esta facultad y luego obtuvo el grado de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en el área de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Realizó un postdoctorado en el Instituto Catalán de Ciencias del Clima, tiene también fuertes vinculaciones con el ICTP (International Centre for Theoretical Physics) de Trieste, lo que le ha permitido expandir notablemente el alcance de sus investigaciones. Tiene una nutrida producción científica de calidad. Ha dirigido dos tesis doctorales y también tiene varias en curso. Es Profesor Adjunto de la Facultad de Ciencias Exactas e Investigador Adjunto del CONICET en el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Sus investigaciones se centran en descripción y predicción de la variabilidad y el cambio del clima. Acabo de mencionar una diversidad de líneas de investigación que Ramio inusualmente ha atravesado a lo largo de su carrera, y estamos hablando de un Premio Estímulo. Es realmente destacable que la diversidad de metodologías que aplica, desde la estadística orientada al clima, pero también el abordaje a través de modelos numéricos del clima, hidrológicos, metodologías para corregir errores en las simulaciones climáticas. Todas estas temáticas no solo son importantes por aumentar el conocimiento científico, sino también por la relevancia que tienen para atender las cuestiones estratégicas relacionadas con el cambio climático. Quiero mencionar también que es pionero en la posibilidad de poder predecir el clima con décadas de anticipación, temática que lo ha llevado a formar parte, de una manera muy temprana, en el programa mundial de investigaciones climáticas de la Organización Meteorológica Mundial. Es por eso que le expreso mis más sinceras felicitaciones, y es un orgullo para la comunidad de las ciencias de la atmósfera y los océanos que Ramiro reciba este premio.

Carolina Vera

Presentación de Esteban Avigliano

Es un honor para la Academia entregar este premio Estímulo en Ciencias Biológicas al Dr. Esteban Avigliano. La decisión no fue sencilla, porque todos los postulantes contaban con excelentes antecedentes, pero el jurado decidió por unanimidad que el Dr. Avigliano se destaca por su productividad académica y por el liderazgo que evidencia su trabajo en el campo de la ictiología, el manejo de recursos pesqueros, identificación de stocks, áreas de cría, desove, e historia de vida de peces de alto valor económico de la Cuenca del Plata y la costa del Océano Atlántico Sudoccidental.

Paralelamente, ha desarrollado una nutrida actividad docente de grado y postgrado, tanto en el país como en el extranjero, así como numerosas actividades de extensión orientadas a la conservación y la explotación sustentable de los recursos naturales.

El Dr. Avigliano es actualmente Investigador Adjunto del CONICET con lugar de trabajo en la Universidad de Buenos Aires. La Academia hace votos porque este reconocimiento contribuya a fortalecer el entusiasmo, creatividad y laboriosidad de este joven investigador, y le desea una larga y próspera carrera en la especialidad elegida.

Demetrio Boltovskoy

BECAS

Becas "In Libris Carpe Rosam"

Por donación de la Ing. Irma Mastronardi en memoria de sus hijos desaparecidos, desde 1999 esta Academia ofrece las becas "In Libris Carpe Rosam" en Matemática y Ciencias Biológicas, respectivamente. Estas becas están destinadas a estudiantes de la Universidad de Buenos Aires, menores de 22 años de edad, y con dedicación exclusiva a las dos áreas mencionadas.

Los beneficiarios de estas becas deben informar a la Academia acerca del avance de sus estudios y al finalizar la misma deben presentar un breve ensayo que refleje sus ideas y opiniones acerca de un acontecimiento nacional o internacional ocurrido en el lapso de la beca, que implique el cercenamiento de derechos humanos, discriminación de cualquier tipo, o que ponga trabas al progreso del conocimiento. Estos ensayos pueden leerse en la página web de la Academia (www.ancefn.org.ar), en el apartado de Becas.

A continuación se detallan los becarios vigentes durante el año 2020.

Lourdes Materazzi (Cs. Biológicas; período de la beca: 2020 - 2021)

Diego Martín Topsakalian (Cs. Biológicas; período de la beca: 2019 - 2021)

Daniela Río (Cs. Biológicas; período de la beca: 2019 - 2020)

Nicolás Chehebar (Matemática; período de la beca: 2019 - 2021)

Lucas de Amorin (Matemática; período de la beca: 2018 - 2021)

Beca "Carlos y Eduardo Brenner"

Creada y solventada con fondos donados por el Dr. Rodolfo R. Brenner, a la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Ivana Ducrey (período de la beca: 2020 - 2023)

Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Argentina), Tomo 72, 2021

COMUNICACIONES CIENTÍFICAS



Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Argentina Tomo 72, 2021

HIPERACUMULACIÓN DE METALES POR PLANTAS

Enrique J. Baran

Académico Emérito de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

E-mail: baran@quimica.unlp.edu.ar

Palabras clave Plantas

hiperacumuladoras Distribución geográfica Elementos hiperacumulados Funciones de la hiperacumulación Aplicaciones Fitoremediación Fitominería

Resumen Algunas plantas han desarrollado la capacidad no solo de sobrevivir en suelos muy ricos en metales sino también de captar y de acumular niveles excepcionalmente elevados de metales o metaloides en sus tejidos. Estas plantas se conocen como hiperacumuladoras. Los elementos más frecuentemente hiperacumulados son níquel, cobre, cobalto y manganeso. En este trabajo se analizan las características más importantes de este fenómeno, así como las peculiaridades relacionadas a la acumulación de diversos elementos. Se han encontrado dos importantes aplicaciones tecnológicas para estas plantas, las que han sido intensamente investigadas durante los últimos 30 años: la fitoremediación (remoción de contaminantes del suelo) y la fitominería (crecimiento de plantas para la extracción y recuperación de metales). Los aspectos más importantes de estos dos procesos también se analizan y discuten brevemente.

Keywords

Hyperaccumulatin g plants Geographical distribution Hyperaccumulated elements Functions of hyperaccumulation Applications Phytoremediation Phytomining Abstract Metal hyperaccumulation by plants. Some plants have developed the capacity not only to survive in metal rich soils but also to capture and accumulate exceptionally high levels of metals and metalloids in his tissues. These plants are known as hyperaccumulators. Nickel, copper, cobalt and manganese are the most frequently hyperaccumulated elements. In this paper the most important characteristics of this phenomenon are analyzed, together with the peculiarities related to the accumulation of different elements. Two important technological applications for these plants have been found and were intensively investigated during the last 30 years: phytoremediation (removal of contaminants from soils) and phytomining (growing plants to harvest metals). The most important aspects of these two processes are also briefly analyzed and discussed.

1. Introducción

Algunas plantas han desarrollado la capacidad no solo de sobrevivir en suelos muy ricos en metales sino también de captar y de acumular niveles excepcionalmente elevados de metales o metaloides en sus tejidos. Estas plantas se llaman hiperacumuladoras (Brooks 1994; Callahan et al. 2006; Rascio y Navari-Izzo 2011). Este término, aparentemente, fue introducido en 1977 por Brooks et al., y la hiperacumulación ha sido reconocida como una respuesta fisiológica extrema a la tolerancia de metales pesados (Baker 1981).

Obviamente, la concentración límite por encima de la cual la planta se considera hiperacumuladora varía con cada metal. Así, se admitió, originalmente, que para níquel esa concentración límite estaría en 1.000 µg/g (referido a material vegetal seco), mientras que para el zinc, cuya abundancia natural en las plantas es mucho mayor, el límite podría estar en 10.000 µg/g. En el otro extremo, una planta conteniendo 1.000 ng/g de oro podría clasificarse de hiperacumuladora de ese metal (Brooks 1994; Rascio y Navari-Izzo 2011).

Cuando crecen en suelos con concentraciones normales de metales, las especies hiperacumuladoras captan concentraciones metálicas mucho más altas que lo que hacen las plantas normales. Sin embargo, cuando son trasplantadas a suelos conteniendo bajos niveles de esos iones, las hiperacumuladoras muestran cuadros normales de desarrollo y crecimiento, indicando que no existen requerimientos fisiológicos esenciales para disponer de elevadas concentraciones metálicas (Callahan et al. 2066; Reeves y Baker 1984).

Las plantas exhiben tres tipos de respuestas básicas, en suelos con niveles potencialmente tóxicos de iones metálicos, los que se muestran gráficamente en la Fig. 1 (Callahan et al. 2006; Baker 1981). Estas respuestas son: la captación irrestricta, la exclusión y la (hiper)acumulación. En la primera, la concentración interna refleja los niveles externos en forma directa, y la planta capta, sin control, las concentraciones de metal que el suelo le ofrece y normalmente la lleva a la toxicidad y muerte. En el fenómeno de exclusión las plantas no translocan el metal hacia los tejidos superiores, lo que facilita su crecimiento en suelos tóxicos para la mayoría de las plantas y recién por encima de un valor crítico ese mecanismo colapsa y resulta de nuevo un transporte irrestricto. Las hiperacumuladoras muestran concentraciones metálicas más altas en sus tejidos que las presentes en el suelo y pueden tolerar esos niveles sin síntomas de toxicidad.

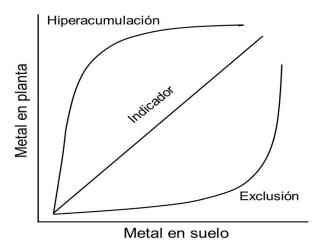


Fig. 1. Estrategias de respuesta de las plantas al aumento de la concentración de metales en el suelo.

Hasta 2010 se habían identificado unas 450 especies de angiospermas como hiperacumuladoras de metales o metaloides (As, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Se, Tl, Zn), lo que implica menos del 0,2% de todas las especies conocidas (Rascio y Navari-Izzo 2011). Ese número ha ido creciendo constantemente a partir de entonces (ver Sección siguiente).

2. Distribución geográfica y elementos hiperacumulados

Existen cuatro tipos de suelos metalíferos que usualmente albergan plantas hiperacumuladoras, estos son: a) suelos serpentinos derivados de rocas ultramáficas ricas en Mg y Fe y enriquecidas en Cr, Co y Ni; b) suelos seleníferos, derivados de rocas ricas en Se; c) suelos de calamina enriquecidos con Zn, Cd y Pb; d) suelos conteniendo Cu y Co, derivados de argilitas y dolomitas (Callahan et al. 2006).

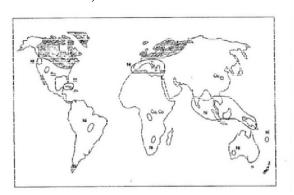


Fig. 2. Mapa que muestra las ubicaciones de la mayoría de las hiperacumuladoras asociadas a suelos metalíferos. El área sombreada indica la extensión de la última glaciación global. De Brooks (1994) y Anderson (2000).

Pero la presencia de suelos metalíferos no necesariamente permite inducir la presencia de hiperacumuladoras, ya que ellas en general sólo han sido descubiertas en regiones tropicales y templadas (ver Fig. 2; Brooks 1994;

Anderson 2000). Esta distribución de especies a nivel mundial sugiere que la evolución ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de esta peculiaridad y que esta evolución ha ocurrido en un tiempo relativamente prolongado. La glaciación cuaternaria seguramente ha eliminado a todas las especies hiperacumuladoras que podían haber existido fuera de los entornos templados y tropicales contemporáneos (Anderson 2000).

Un problema actual bastante evidente, que circula habitualmente en los medios académicos abocados a esta temática, es que no se conoce con exactitud cuántas especies hiperacumuladoras realmente existen, dado que la información referida a ellas está dispersada en una variedad de diferentes tipos de fuentes. Esto hace deseable disponer de una base de datos completa y confiable que reúna toda esta información (Reeves et al. 2018). Esta situación había sido encarada, parcialmente, en Canadá con la creación de la base de datos PHYTOREM y extendida en la base METALS desarrollada en la Universidad de Sheffield, hasta que a partir de 2015 se estableció la Global Hyperaccumulator Database (www.hyperaccumulators.org), administrada por el Centre for Mined Land Rehabilitation of the University of Queensland (Brisbane, Australia), base de datos que está habilitada, sin restricciones, a cualquier interesado (Reeves et al. 2018).

Los datos incluidos en esa base de datos, permiten ahora establecer nuevos criterios para definir la hiperacumulación en base al contenido de metal en los tejidos foliares desecados de las plantas, cuando las mismas crecen en su hábitat natural. Y estos valores límites resultan ser los siguientes: para Cd, Tl, Se > 100 µg/g, para Co, Cu, Cr > 300 µg/g, para Ni, As, Pb, tierras raras > 1.000 µg/g, para Zn > 3.000 µg/g y para Mn > 10.000 µg/g (Reeves et al. 2018).

En la Tabla 1 se muestran nuevamente estos valores límites, junto al número de especies hasta ahora conocidas para cada elemento. Como puede verse, allí se reúne un total de 755 especies, algunas de las cuales pueden hiperacumular más de un metal (Brooks 1994; Reeves et al. 2018). Estos números seguramente van a irse modificando, a medida que se hagan nuevos descubrimientos, así como si algunos de los reportes anteriores resultaran descartados. Estas 755 especies pertenecen a 52 familias y ca. 130 géneros de plantas. Las familias más fuertemente representadas son la Brassicaceae (83 especies) y la Phyllanthaceae (59 especies).

Como puede verse de esta tabla el níquel es, por lejos, el metal más frecuentemente hiperacumulado, seguido por cobre, cobalto manganeso y selenio. En las secciones siguientes presentaremos algunos comentarios generales sobre la hiperacumulación de los elementos listados, excepto del níquel, del cual en base a la mayor cantidad de ejemplos e información disponible, puede hacerse un análisis mucho más detallado y pormenorizado de su hiperacumulación en diferente tipo de plantas.

Tabla 1. Número de especies hiperacumuladoras listadas en la *Global Database* (hasta setiembre de 2017), indicando también los valores límites (referidos a material foliar seco) para los cuales se estima que ocurre el fenómeno (Reeves et al. 2018). T.R.: Tierras raras (elementos lantánidos).

Elemento	Valor límite (µg/g)	Especies
Arsénico	> 1.000	5
Cadmio	> 100	7
Cobre	> 300	53
Cobalto	> 300	42
Manganeso	> 10.000	42
Níquel	> 1.000	532
Plomo	> 1.000	8
T.R.	> 1.000	2
Selenio	> 100	41
Talio	> 100	2
Cromo	> 300	1
Zinc	> 3.000	20

3. Hiperacumulación de elementos metálicos y no metálicos

3.1. Hiperacumulación de cobre y cobalto

Estos dos elementos pueden manejarse conjuntamente porque las plantas que los hiperacumulan están todas en la misma región geográfica, básicamente la provincia de Shaba en la República Democrática del Congo. También se han encontrado varias plantas capaces de hiperacumular a ambos elementos (Brooks 1994). Y, como puede verse en Tabla 1, hay más de 90 especies de plantas capaces de hiperacumular a estos dos metales.

En el caso del cobre, la especie que es capaz de hiperacumular la mayor concentración de este metal es la planta *Aeollanthus biformifolius*, que llega a acumular hasta 13.500 μg/g del mismo (Malaisse et al. 1978; Brooks 1994). Por su distribución, esta planta puede ser considerada como endémica de la parte sur de los depósitos mineros de Shaba y podría ser denominada como "flor de cobre" debido a su exclusiva ocurrencia sobre esos depósitos minerales (Malaisse et al. 1978).

Por otra parte, las especies del género Haumaniastrum, recogidas en la misma región geográfica, muestran una fuerte tendencia a la acumulación de cobre pero una de ellas, Haumaniastrum robertii, es particularmente interesante porque aparte de hiperacumular cobre también hiperacumula cobalto, en cantidades del orden de los $4.300~\mu g/g$ (Brooks 1977, 1994), siendo este el mayor valor hiperacumulado, reportado hasta el presente (Reeves et al. 2018).

3.2. Hiperacumulación de manganeso

Recién durante los últimos años ha habido un interesante aumento en el conocimiento de plantas capaces de hiperacumular este metal. Un primer ejemplo interesante de mencionar es una planta nativa de Australia, *Austromyrtus bidwillii*, que llega a contener hasta 26.500 µg/g de Mn (Bidwell et al. 2002). Un aspecto remarcable, es que casi un 40% del manganeso contenido en las hojas de esa planta puede ser extraído con agua, sugiriendo que una parte del metal está asociada a compuestos solubles, tales como ácidos orgánicos. Este aspecto, fue confirmado mediante el uso de técnicas cromatográficas y espectrometría de masas, mostrando la presencia de los ácidos succínico, málico, malónico, oxálico y cítrico (Bidwell et al. 2002).

Otra especie interesante es la hierba perenne *Phytolacca acinosa*, que ocurre en varias regiones del sur de China, encontrada en suelos ricos en manganeso y que muestra una remarcable tolerancia al elemento, mostrando además una notable capacidad de hiperacumulación, que llega hasta concentraciones del orden de los 19.300 µg/g (Xue et al. 2004). Otra planta de amplia distribución en regiones subtropicales de China, *Schima superba*, y en este caso localizada en una región minera donde antiguamente se explotaba manganeso, también mostró una gran capacidad de hiperacumulación, llegándose a registrar valores del orden de los 62.400 µg/g (Yang et al. 2008).

Las plantas hiperacumuladoras de manganeso parecen ser muy abundantes en la isla de Nueva Caledonia (Fernando et al. 2008). Una de las especies endémicas que se desarrolla en esa isla es el arbusto *Maytenus founieri*, que puede hiperacumular una cantidad muy importante de Mn, del orden de 20.000 µg/g en sus hojas (Fernando et al. 2008), mientras que *Virotia neurophylla*, una planta de la familia Protaceae, también endémica de Nueva Caledonia que puede llegar a acumular hasta 55.000 µg/g en sus hojas, parece ser hasta ahora la mayor hiperacumuladora de este metal (Reeves et al. 2018).

3.3. Hiperacumulación de zinc

En una puesta al día reciente, ya se mencionan 28 ejemplos de plantas hiperacumuladoras de zinc (Balafrej et al. 2020), a diferencia de las 20 mencionadas en la Tabla 1, mostrando los rápidos y continuados avances que se producen en este campo de investigación. Muchas de estas plantas son capaces de acumular más 10.000 μg/g de zinc en sus partes aéreas, cuando crecen y se desarrollan en su hábitat natural (Balafrej et al. 2020).

Las primeras especies hiperacumuladoras de zinc fueron descriptas en suelos ricos en este elemento, localizados en el oeste de Alemania y en el este de Bélgica, donde existe una flora hiperacumuladora fuertemente dominada por las especies *Viola calaminaria* y *Thlapsi calaminare* (Brooks 1994).

Más recientemente, se han encontrado una variedad de plantas en las que la hiperacumulación de zinc es notablemente elevada, y muchas veces además de zinc esas plantas suelen incorporar cantidades importantes de cadmio o plomo. Así, por ejemplo, la *Arabidopsis halleri* y la *Noccaea caerulescens* tienen la capacidad de hiperacumular concentraciones de Zn del orden de los 13.600 y 43.700 μg/g del metal, respectivamente, cuando se desarrollan en suelos metalíferos enriquecidos en zinc (Balafrej et al. 2020). Este último valor representa la mayor concentración hiperacumulada reportada hasta el presente (Reeves et al. 2001, 2018). Adicionalmente, las especies *Dichapetalum sumatranum* y *Dichapetalum pilosum* suelen acumular más de 15.600 y 26.300 μg/g de zinc, respectivamente, en sus hojas (Balafrej et al. 2020).

3.4. Hiperacumulación de cadmio y plomo

Estos dos elementos pueden tratarse conjuntamente, ya que muchas plantas son capaces de acumular a ambos. A fines del siglo pasado se descubrieron los primeros hiperacumuladores de cadmio; curiosamente dos de ellos, *Arabidopsis halleri* y la *Noccaea caerulescens*, son también fuertes hiperacumuladoras de zinc, como se mencionara arriba (Reeves et al. 2001; van der Ent et al. 2013).

En años recientes se ha descubierto una gran variedad de hiperacumuladoras de Zn, Cd y Pb en diferentes regiones de China (van der Ent et al. 2013). Así en la provincia de Yunnan, donde se estudió un importante número de plantas se encontró que algunas de ellas hiperacumulaban los tres metales mencionados. Así, la *Silene viscidula* llega a acumular unos 3.900 μg/g de Pb, 11.155 μg/g de zinc y 236 μg/g de cadmio, mientras que *S. gracilicanlis* y *Onosma paniculatum* demostraron ser potentes hiperacumuladoras de plomo, acumulando unos 3.600 μg/g y 87.700 μg/g de Pb, respectivamente (Wang et al. 2009). Por su parte, *Lysimachia deltoides* resultó ser una buena hiperacumuladora de Cd (212 μg/g) (Wang et al. 2009).

Otra especie estudiada en China, *Viola baoshanensis*, mostró también ser una potente hiperacumuladora de los tres elementos, acumulando 1.090 μ g/g de Cd, 1.090 μ g/g de Pb y 3.420 μ g/g de Zn (Wu et al. 2010).

Otras especies hiperacumuladoras de cadmio, descriptas también en China son *Roripa globulosa*, *Solanum nigrum* y *Sedum alfredii* (Balafrej et al. 2020).

Los mayores valores de hiperacumulación para estos dos elementos fueron observados en *Arabidopsis halleri* (Cd) = $3.600 \,\mu\text{g/g}$ (Stein et al. 2017; Reeves et al. 2018), y en *Noccaea rotondifolia* (Pb) = $8.200 \,\mu\text{g/g}$ (Reeves y Brook 1983; Reeves et al. 2018).

3.5. Hiperacumulación de selenio

Plantas hiperacumuladoras de selenio están ampliamente difundidas en los EEUU de NA y en Australia y la mayoría de ellas pertenecen a las familias de las Fabaceae tales como el género *Astragalus*, incluyendo *Astragalus bisulcatus* y a las Brassicaceae, incluyendo *Stanleya pinnata*; estas dos especies hiperacumulan más de 10.000 μg/g (Freeman et al. 2006; van der Ent et al. 2013).

Entre otras especies que hiperacumulan fuertemente al selenio debemos mencionar además a *Dieteria canescens*, *Oonopsis foliosa*, *Oonopsis wardii*, *Xylorhiza parryl*, *Astragalus crotalariae* y *Astragalus racemosus* (White 2016). El *Astragulus bisulcatus* parece ser el mayor hiperacumulador de Se reportado hasta ahora, acumulando hasta unos 15.000 μg/g, en el período anual en el que su poder acumulativo es máximo (Galeas et al. 2007; Reeves et al. 2018).

3.6. Hiperacumulación de arsénico y talio

Estos dos elementos, sumamente tóxicos, pueden ser analizados conjuntamente por que el número de ejemplos conocidos todavía es relativamente reducido (ver Tabla 1).

Concentraciones relativamente altas de arsénico han sido reportadas muchas veces en diverso tipo de helechos, en áreas fuertemente contaminadas por producciones industriales (van der Ent et al. 2013). La hiperacumulación de As ha sido descripta para un cierto número especies de *Pteris* (un género de helechos, perteneciente a la familia *Pteridaceae*), muy notablemente en *Pteris vittata*, que acumula hasta 22.630 µg/g de As (Ma et al. 2001; van der Ent et al. 2013), este fue el primer helecho reconocido como hiperacumulador de arsénico y es, entre todas las especies descriptas hasta el presente, la que más As es capaz de acumular (Reeves et al. 2018). Otra especie de helecho capaz de acumular cantidades importantes de As es *Pytiograma calomelanos*, que acumula hasta 8.350 µg/g del elemento (van der Ent et al. 2013).

En plantas acuáticas, expuestas a concentraciones elevadas de arsénico en las aguas, muchas veces se han encontrado también valores muy elevados de As acumulado, aunque en este caso podría tratarse de arsénico incorporado a las células periféricas de las hojas, antes que de una "acumulación activa" (van der Ent et al. 2013).

En el caso del talio, sólo existen unos pocos ejemplos de especies hiperacumuladoras, todas ellas localizadas en el sur de Francia (van der Ent et al. 2013). La hierba perenne *Biscutella levigata*, que acumula hasta 19.400 μg/g de Tl (LaCoste et al. 1999), es hasta ahora la mayor hiperacumuladora conocida (Reeves et al. 2018). Por su parte, la planta herbácea *Iberis intermedia*, llega a acumular hasta 2.800 μg/g de talio (van der Ent et al. 2013).

Recientemente, en un estudio realizado en la región de Yunnan, en el sudoeste de China, se encontró que *Pteris vittata*, el fuerte hioperacumulador de As arriba mencionado, es también un potente acumulador de talio (Wei et al. 2020).

3.7. Hiperacumulación de cromo

No existe todavía demasiada información sobre plantas que hiperacumulen este metal; los reportes hasta ahora publicados indican que las especies *Leersia hexandra* y *Spartiana argentinensis* serían buenas hiperacumuladoras de este metal (van der Ent et al. 2013). Sin embargo, en general, los valores de Cr acumulados difieren marcadamente según los sitios y plantas analizadas, lo que sugiere una cierta contaminación superficial de las especies investigadas (van der Ent et al. 2013), razón por la cual se debería continuar investigando más detenidamente estas primeras y, aparentemente, prometedoras especies.

3.8. Hiperacumulación de elementos lantánidos

Recientemente se ha reportado la acumulación de algunos elementos lantánidos livianos (La, Ce, Pr, Nd) predominantemente en algunas regiones de China (van der Ent et al. 2013). A este respecto, ha habido una gran actividad de investigación de este tema por parte de grupos de investigación chinos y algunos resultados recientes y muy representativos, originado en uno de esos grupos, han dado origen a un capítulo de un libro de aparición reciente (Liu et al. 2018). En el mismo, se reporta que, a la fecha, se han identificado más de 20 especies de plantas capaces de acumular o hiperacumular elementos lantánidos. Esas plantas pertenecen a 11 familias y 11 géneros, y el mayor número de ellas se encuentran entre los helechos (Liu et al. 2018).

Como ejemplo, el helecho *Dichropteris dichotoma*, hiperacumula hasta 7.000 µg/g de esos lantánidos livianos (Shan et al. 2003), mientras que otro

helecho, el *Pronephrium simplex*, llega a acumular hasta $3.000~\mu g/g$ (Lai et al. 2006).

Otras especies hiperacumuladoras, capaces de acumular más de 1.000 µg/g de elementos lantánidos son *Carya tormentosa*, *Carya cathayensis*, *Blechnum orientale* y *Pronephrium triphyllum* (Liu et al. 2018).

Asimismo, se ha logrado establecer una buena y clara correlación entre la concentración de los elementos lantánidos en el suelo, y las concentraciones de los mismos acumuladas en las plantas. Por otro lado, a veces se ha encontrado que esa correlación no es buena en el caso del cerio. Esta situación se ha interpretado en el hecho de que en los suelos el cerio habitualmente se encuentra como Ce(IV), especie que participa con facilidad en reacciones hidrolíticas, lo que dificultaría su absorción por parte de las plantas (Liu et al. 2018).

3.9. Hiperacumulación de níquel

Como se mencionó más arriba, y como queda claramente evidente en la Tabla 1, el níquel es, por lejos, el metal del cual más ejemplos de hiperacumulación se conocen. Por lo tanto, también ha sido hasta el presente el elemento más investigado en relación a este fenómeno. Incluso, el Ni fue el primer elemento para el cual se demostró que podía ser hiperacumulado por plantas (van der Ent et al. 2017).

Las plantas que hiperacumulan níquel están distribuidas especialmente en ocho regiones geográficas principales: Nueva Caledonia, Australia, Sud de Europa y Asia Menor, el archipiélago malayo, Cuba, Oeste de los EEUU de NA, centro de Brasil y sur de África (ver otra vez Fig. 2) (Brooks 1994). La mayor concentración y diversidad de plantas de este tipo ha sido encontrada en dos islas: Nueva Caledonia y Cuba.

El caso de Nueva Caledonia es muy particular y merece un comentario adicional. Los suelos de este grupo de islas son muy ricos en níquel, tanto es así que han transformado a Nueva Caledonia en uno de los principales productores de níquel a nivel mundial (de acuerdo a los datos publicados por el U.S. Geological Survey, en 2019 ocupó junto a Rusia la tercera posición entre los países productores, luego de Indonesia y las Filipinas). Por otro lado, la flora de las islas está conformada por unas 3.300 especies, un 75% de las cuales es endémica de las islas y unas 40 de estas plantas endémicas han sido reconocidas como hiperacumuladoras de níquel (Perrier et al. 2004). Las mismas pertenecen a 14 géneros y 8 familias diferentes, a saber: Agatea (Escalloniaceae), (Violaceae), Argophyllum Casearia (Flacourtiaceae), Cleidion (Euphorbiaceae), Geissois (Cunoniaceae), Homalium (Flacourtiaceae), Hybanthus (Violaceae), Lasiochlamys (Flacourtiaceae),

Oncontheca (Oconthecaeae), Pancheria (Cunoniaceae), Phyllantus (Euphorbiaceae), Psychotria (Rubiaceae), Sebertia (Sapotaceae) y Xylosma (Flacourtiaceae) (Brooks 1994).

El ejemplo más extremo de hiperacumulación de níquel reportado hasta el presente, se da precisamente en una de esas plantas endémicas de Nueva Caledonia, *Sebertia acuminata* Pierre ex Baillon (recientemente denominada *Pycnandria acuminata*). La concentración de Ni en el látex de esta planta fue determinada como ~ 25% de la masa seca y esta es la concentración más alta de níquel encontrada hasta ahora en cualquier fluido biológico (Jaffré et al. 1976; Callahan et al. 2006). La masa total de níquel contenida en una única planta, que suele alcanzar hasta los 15 m de altura, se ha estimado en unos 37 Kg (Sagner et al. 1998). Por otro lado, la concentración de níquel encontrada en las hojas de la planta, es de *ca.* 25.000 μg/g (Perrier et al. 2004).

La acumulación más importante de níquel reportada hasta ahora en hojas, fue determinada en *Berkheya coddi* Roessler, una planta herbácea endémica que crece en suelos ultramáficos, enriquecidos en níquel, de Sudáfrica. En las hojas de algunas plantas de esa especie se han reportado valores de níquel de hasta 76.100 μg/g (Mesjasz-Przybylowicz et al. 2004; Reeves et al. 2018). Asimismo, se han encontrado evidencias de que esta especie de planta también podría acumular Cd, Pb y Zn (Mesjasz-Przybylowicz et al. 2004).

Desde el punto de vista histórico, la especie vegetal inicialmente más estudiada por su capacidad acumuladora de níquel fue el Alyssum. El Alyssum es un género de unas 150-170 especies de plantas, de la familia Brassicaceae, nativas de Europa, Asia y el norte de Africa, cuya mayor diversidad se encuentra en la región mediterránea. Los primeros estudios se publicaron a mediados del siglo pasado, revelando contenidos de Ni superiores a 1.000 μg/g y demostrando posteriormente que estas plantas crecen en suelos serpentinos ultramáficos extendidos por todo el sur de Europa desde Portugal hasta el este de Turquía (Brooks 1994). El centro de máxima diversidad y multiplicidad se encuentra en Anatolia y el grado de endemismo de estas plantas es marcadamente elevado, tal es así que algunas especies se hallan confinadas a sólo unas pocas hectáreas de terreno (Brooks 1994). Se ha sugerido que cuanto mayor es el contenido de Ni de una especie de *Alyssum*, más acotada debería ser su área de distribución (Brooks et al.1979; Brooks 1994). Así por ejemplo, A. troodii (que acumula 17.100 μg/g Ni) se encuentra sólo en una muy pequeña región de Chipre mientras que A. alpestre (acumula 4.500 μg/g Ni) se encuentra a lo largo de todo el este del Mediterráneo. Parece existir una relación entre alta concentración de Ni por un lado, y un alto grado de diversidad, proliferación y endemismo, por el otro (Brooks 1994).

Algunas plantas de la especie *Peltaria*, también perteneciente a la familia Brassicaceae, recogidas en el norte de Grecia también acumulan una cantidad importante de níquel. Por ejemplo, *P. emarginata* llega a

hiperacumular hasta $34.400 \mu g/g$ de Ni, y *P. dumulosa* hasta $18.900 \mu g/g$ de Ni (Reeves et al. 1980; Banil et al. 2010).

Una región geográfica particularmente interesante de analizar es la de Cuba y otras islas aledañas del Caribe. En esta región se han descripto 157 especies de plantas capaces de acumular níquel, 122 de ellas son hiperacumuladoreas y las familias más numerosas son Astaraceae, Euphorbiaceae y Rubiaceae. Además, todos los taxones son caribeños, 152 de los cuales son cubanos (todos, menos uno, endémicos), dos taxa de la República Dominicana (ambos endémicos) y tres de Puerto Rico (ninguno endémico) (Berazaín-Iturralde 1999).

La cantidad de plantas hiperacumuladoras de Ni descriptas en Cuba, constituye hasta el presente el mayor número de especies de este tipo encontradas en un único país (Reeves et al. 1996, 1999; Berazaín-Iturralde 1999). Una investigación detallada de estas plantas y de los suelos en los que habitan, reveló que el número de hiperacumuladoras es mayor en los suelos serpentinos más antiguos, que se supone estuvieron disponibles para su colonización durante los últimos 10-30 millones de años. Tanto las hiperacumuladoras de Ni como las especies endémicas generalmente son mucho más frecuentes en esos suelos antiguos, existentes en ambos extremos de la isla, que en aquellos desarrollados durante el último millón de años, y localizados en la parte central de la isla (Reeves et al. 1996,1999). Por otra parte, más de 50 especies hiperacumuladoras estudiadas en Cuba son capaces de acumular concentraciones de níquel superiores a los 10.000 μg/g (Reeves et al. 1999).

También resulta interesante de comentar que si bien el resto de América Latina posee una gran abundancia y diversidad de yacimientos y depósitos de minerales metálicos, hasta el presente se han descripto muy pocas especies vegetales tolerantes o hiperacumuladoras. Esto podría deberse tanto a la escasez de estudios científicos sobre la vegetación nativa, como a la falta de metodologías biogeoquímicas adecuadas para su investigación, más bien que a la ausencia real de este tipo de vegetales en la región. Aparte de la gran abundancia de hiperacumuladoras existentes en Cuba, y comentadas más arriba, sólo existen unos pocos reportes de este tipo de especies en Perú y en Venezuela, mientras que en una región central de Brasil se ha encontrado y descripto una gran variedad de ellas (Ginocchio y Baker 2004).

En los suelos ultramáficos del estado de Goias, en Brasil existe una gran diversidad de especies hiperacumuladoras de níquel. Inicialmente se realizaron estudios de suelos y plantas de esa región en 1988 y 1990 (Brooks 1994; Reeves et al. 2007), los que fueron extendidos por trabajos posteriores iniciados en 2005 (Reeves et al. 2007). En la expedición de 2005, se recogieron unas 800 especies de plantas que crecen en esta área y se realizaron análisis

químicos de más de 120 muestras representativas de los suelos en los que ellas se desarrollan (Reeves et al. 2007).

En 79 de las especies recolectadas se determinó hiperacumulación de Ni; las hiperacumuladoras más notables incluyen *Pfaffia sarcophylla* (Amarantaceae), especies de *Justicia*, *Lophosyachys* y *Ruellia* (Acanthaceae), *Porohyllum* (Asteraceae) y otras (Reeves et al. 2007). Es interesante de mencionar que una planta, de la familia Euphorbiaceae, y que puede crecer hasta una altura de dos metros, produce un látex muy rico en Ni, conteniendo hasta 1,35% del metal. Esta planta, inicialmente fue clasificada incorrectamente como una especie de *Jatropha* (Brooks 1994; Reeves et al. 2007) y corregida posteriormente como *Cnidoscolus* (Reeves et al. 2007).

4. ¿Por qué las plantas hiperacumulan metales?

El descubrimiento de que algunas clases de plantas concentran niveles excepcionalmente elevados de elementos que normalmente son tóxicos ha despertado considerable interés, desafiando a biólogos, bioquímicos y botánicos a encontrar razones para este comportamiento inusual, simplemente proveyendo respuestas a la simple pregunta: por qué las plantas hacen esto? En otras palabras, cuáles son las funciones que origina la hiperacumulación en estas plantas y cuáles son los beneficios y los valores adaptativos de la hiperacumulación de metales (Rascio y Navari-Izzo 2011).

Se han propuesto una variedad de hipótesis para explicar el fenómeno: tolerancia a metales por retención en las hojas, resistencia a la sequía, interferencia con plantas vecinas o defensa frente enemigos naturales (Rascio y Navari-Izzo 2011; Jaffré et al. 2018). De acuerdo a la primera hipótesis, el mecanismo de hiperacumulación permitiría a las plantas a desplazar los metales tóxicos de las raíces y secuestrarlas a los tejidos, más tolerantes, de las hojas. Otra explicación que ha sido postulada, es que altas concentraciones metálicas aumentarían la resistencia de las plantas a la sequía, con un papel de conservantes de la humedad en las paredes celulares o actuando como osmolitos en el interior de las células. Sin embargo, ambas hipótesis no han encontrado hasta el presente suficiente evidencia experimental.

En cambio, la hipótesis de interferencia, a veces llamada también "alolopatía elemental", sugiere que las plantas hiperacumuladoras perennes podrían interferir con el desarrollo de plantas vecinas, por enriquecimiento metálico de la superficie del suelo. Esto impediría el establecimiento de especies vegetales menos tolerantes. Sin embargo, también esta hipótesis encierra muchas controversias y ha sido cuestionada. Así, se ha demostrado que en zonas pobladas por *Alyssum* y donde se acumulan grandes cantidades de hojas, ricas en Ni, alrededor de las hiperacumuladoras, no se inhibe mucho la germinación de semillas de otras plantas (Rascio y Navari-Izzo 2011). La

ausencia de efecto alelopático se debe probablemente al hecho de que la mayor parte del níquel liberado por la biomasa de hojas, no permanece en forma soluble y fitodisponible, sino que rápidamente es ligada a constituyentes del suelo, quedando indisponible para ser capturado por las plantas (Rascio y Navari-Izzo 2011; Jaffré et al. 2018).

La hipótesis que ha generado la mayor atención sugiere que las elevadas concentraciones de metal en las partes aéreas de las plantas podrían funcionar estrategia desarrollada como una por hiperacumuladoras para enfrentar a algunos enemigos naturales, tales como los herbívoros o los patógenos. Esta hipótesis de "defensa elemental" ha sido testeada en muchas oportunidades y aunque todavía existen resultados contradictorios, se ha demostrado una función defensiva por parte de Ni, Cd, Zn, As y Se (Rascio y Navari-Izzo 2011; Schiavon y Pilon-Smits 2017). De todas formas, es evidente que esta hipótesis debe ser confirmada por más estudios experimentales, sobre todo, variando el tipo de especies de plantas y realizando mayor cantidad de tareas de campo (Rascio y Navari-Izzo 2011).

Recientemente ha surgido otra hipótesis relacionada con los mecanismos de defensa, llamada hipótesis de los "efectos conjuntos" sugiriendo que esos mecanismos involucren también una variedad de compuestos orgánicos (metabolitos secundarios), es decir que habría un actividad conjunta entre los metales acumulados y ciertos metabolitos orgánicos generados por las mismas plantas (Rascio y Navari-Izzo 2011).

5. Captación, transporte y acumulación de los metales

Estos aspectos encierran problemáticas sumamente complejas, las que en gran parte no están definitivamente aclaradas o cabalmente comprendidas. Por lo tanto, haremos aquí solamente un breve resumen de los aspectos más relevantes de las mismas.

Diversos estudios fisiológicos han empezado a abrir el camino para avanzar en la comprensión de los mecanismos de hiperacumulación, incluyendo una mayor captación metálica, un incremento en la carga del xilema y un incremento en la detoxificación de los brotes (Verbruggen at al. 2009). El análisis de la tolerancia y de la acumulación de metales ha avanzado notablemente a partir de la utilización de información a nivel molecular, en particular la desarrollada para la especie *A. thaliana*. Y estos estudios avalan la idea que los genes involucrados en la hiperacumulación o la hipertolerancia no son especies-específicos, sino simplemente son diferentemente expresados y regulados, en comparación con los de especies no-hiperacumuladoras (Verbruggen at al. 2009).

La hiperacumulación de Zn es, probablemente, el ejemplo mejor comprendido de hiperacumulación metálica a nivel molecular. La existencia de especies muy relacionadas a *A. thaliana* y que muestran hiperacumulación de zinc ayudó a este rápido progreso, siendo *A. halleri* la especie hiperacumuladora más fuertemente relacionada (Verbruggen et al. 2009; Krämer 2010). Existe una serie de moléculas presentes en las plantas que desempeñan un papel importante como ligandos en la secuestración de metales del suelo, su transporte hacia los tejidos superiores y, finalmente, en su acumulación (Callahan et al. 2006).

La primera etapa en la captación del metal por las plantas, es su interacción con el suelo. En general, la solubilidad de muchas sales metálicas inorgánicas decrece marcadamente a pH > 5 como resultado de la formación de oxo-hidróxidos insolubles. Para poder solubilizar a los metales las plantas deben interactuar con el suelo en la rizoesfera (la zona del suelo que rodea a la raíz). Un aumento en la disponibilidad de los metales está usualmente asociado con la presencia de microbios, disminución del pH, cambios en el potencial redox y/o exudación de ligandos (Callahan et al. 2006).

En este contexto, y para la captación de hierro, se han identificado dos estrategias básicas de captación (Callahan et al. 2006; Baran 2013). En la llamada **estrategia I**, que es utilizada por las plantas no gramíneas, se utilizan tres procesos concurrentes (disminución del pH en la rizoesfera, reducción del Fe(III) y transporte del Fe(II) generado). Para lograr bajar el pH, las plantas envían protones hacia la rizoesfera, admitiéndose que estas llamadas bombas de protones están impulsadas por ATP-asas de membranas plasmáticas. Por cada unidad de disminución del pH el hierro aumenta su solubilidad unas mil veces. Por otra parte, el requerimiento de una etapa de reducción implica la existencia de una reductasa férrica plasmática, la que ha sido descripta tanto en células procariotas como eucariotas (Baran 2013). Finalmente, una vez que el Fe(III) ha sido reducido, el ion ferroso debe ser transportado al interior de la planta. El tipo y las características generales de los transportadores involucrados todavía no son bien conocidos (Callahan et al. 2006; Baran 2013).

En la denominada **estrategia II**, utilizada por las gramíneas, las plantas emplean una estrategia de quelación, sintetizando amino ácidos noprotéicos, denominados fitosideroforos, los que son excretados a la rizoesfera y ligan fuertemente al Fe(III), transportándolo al interior de la planta en esa forma complejada (Callahan et al. 2006; Baran 2013). El fitosideroforo más común y más estudiado es, sin duda, el ácido muginéico, cuya estructura se esquematiza en la Fig. 3.

Fig. 3. Estructura esquemática del ácido muginéico.

Este, y otros fitosideroforos relacionados, pueden también quelar a otros iones metálicos presentes en los suelos, como ser Zn(II), Cu(II), Mn(II) y Ni(II) y, eventualmente, Cd(II) (Treeby et al. 1989; Römheld 1991; Baran 2013). Esta sería una de las posibles maneras en que varios de los elementos metálicos discutidos hasta aquí son captados por las raíces y luego incorporados al tejido vegetal. Obviamente, para cada uno de los metales, pueden existir otros mecanismos de captación los que, en muchos casos, todavía no son bien conocidos o cabalmente comprendidos (Kabata-Pendias 2011).

El transporte de los iones en el tejido vegetal y hacia los órganos de las plantas, involucra diversos procesos: a) movimientos en el xilema, b) movimiento en los brotes, c) depósito, acumulación e inmovilización. Esta movilidad dentro de los tejidos está gobernada por varios factores concurrentes tales como el valor del pH, el estado redox del metal, la presencia de cationes competidores, fenómenos de hidrólisis/polimerización o la posibilidad de formación de especies insolubles (p.ej., oxalatos, fosfatos). La formación de especies complejas, mediante su interacción con amino ácidos u otros ácidos orgánicos previene la inmovilización de los cationes en el xilema y permite su transferencia a los brotes y otros tejidos. También debe considerarse la posibilidad de que algún metal quede inmovilizado en las raíces, situación que tendrá un fuerte impacto en su posible translocación a las partes superiores de la planta (Kabata-Pendias 2011).

Una propiedad clave de las hiperacumuladoras es la gran eficiencia en el manejo de la detoxificación y secuestración de los metales acumulados, que les permite concentrar cantidades importantes de metales en las partes superiores de la planta sin sufrir efectos fitotóxicos. Esta acumulación excepcionalmente elevada de metales se torna más asombrosa cuando se descubre que la misma ocurre principalmente en las hojas, donde tiene lugar la fotosíntesis, un proceso esencial para la supervivencia de las plantas, y que el aparato fotosintético es uno de los blancos principales para muchos de estos contaminantes. Sin embargo, la localización preferencial para la detoxificación/secuestración de metales ocurre en sitios tales como la epidermis, los tricomas y aun la cutícula de las hojas, donde prácticamente no ocasionan daño al aparato fotosintético (Verbruggen et al. 2009).

Por todo lo dicho, resulta evidente que es importante conocer la forma en que las especies metálicas quedan complejadas en la planta, tanto en su proceso de transporte como en su acumulación final. Esto nos lleva al punto siguiente que es la discusión del tipo de complejos que los metales pueden formar en la planta y el tipo de ligandos que habitualmente participa de estos procesos.

6. Ligandos que forman complejos metálicos en plantas hiperacumuladoras

Está claro que sólo una pequeña fracción del metal contenido en las plantas está presente en forma de su acuo-ion libre, esto es, [M(H₂O)₆]ⁿ⁺. Se presume que los cationes metálicos están unidos a ligandos de bajo peso molecular o a proteínas (Callahan et al. 2006). Las mismas plantas pueden generar un cierto número de posibles ligandos, incluyendo ácidos orgánicos, amino ácidos, péptidos y proteínas (Callahan et al. 2006; Verbruggen at al. 2009). Si bien se han descubierto diversos aspectos vinculados a las interacciones metal/ligando en plantas hiperacumuladoras, no hay todavía un panorama claro de los diferentes agentes quelantes involucrados en las diversas etapas de transporte y acumulación de metales en estas plantas. Es más, se ha encontrado que la naturaleza de estos ligandos difiere, dependiendo de su localización en la planta o hasta de la edad de la planta (Verbruggen et al. 2009).

Se piensa que ligandos con donores nitrogenados deben desempeñar un papel importante en estos procesos de hiperacumulación. En particular, el amino ácido histidina (Fig. 4) es considerado como de importancia central en estos procesos de hiperacumulación (Callahan et al. 2006: Verbruggen at al. 2009), y en particular en el caso del níquel (Krämer et al. 1996; Hayden y Cobbett 2007; Verbruggen et al. 2009). La histidina puede actuar como ligando tridentado a través de su grupo carboxilato, y sus funciones amino e imidazol y es un ligando sumamente versátil, con una variado número de modos de coordinación conocidos (Szabó-Plánka et al. 2000).

Por otra parte, las constantes de estabilidad de los complejos de Ni(II)/histidina son mayores que las de complejos similares de Fe(II), Co(II) y Zn(II); solamente el Cu(II) se liga más fuertemente a la histidina que el Ni(II) (Martell y Smith 1974).

Fig. 4. Estructura esquemática de la histidina.

En el complejo sintético [Ni(his)₂]·H₂O el Ni(II) se ubica sobre un eje binario y está coordinado octaédricamente por el N del amino, el N del imidazol y un O del carboxilo de cada histidina, a distancias de 2.11, 2.09 y 2.11 Å, respectivamente (Fraser y Harding 1967).

Diferentes estudios de un importante número de especies de plantas (hiperacumuladoras y no-hiperacumuladoras) sugieren claramente que la histidina debe estar involucrada en la hiperacumulación. Sin embargo, su forma de implicancia en este proceso todavía no está claramente definida (Callahan et al. 2006).

Es bien conocido el hecho de que varios ácidos carboxílicos simples se encuentran presentes en concentraciones relativamente elevadas en las vacuolas celulares de tejidos fotosintéticos, incluyendo los ácidos cítrico, isocítrico, tartárico, málico, malónico, oxálico y aconítico. Diversos estudios han demostrado que estos ácidos podrían desempeñar un papel en la hiperacumulación, dado que muchas veces se ha observado un aumento en los niveles de alguno de ellos en respuesta a un aumento de la concentración de metales en el suelo (Callahan et al. 2006). Sin embargo, el hecho de que los complejos metálicos de estos ácidos orgánicos presenten constantes de estabilidad relativamente bajas, hacen dudar de su papel en los mecanismos de hiperacumulación (tales como el transporte a largas distancias) (Callahan et al. 2006; Verbruggen et al. 2009). Así, tal vez su función estaría limitada a la secuestración vacuolar, ya que la formación de estos complejos estaría favorecida por el medio ácido de esas vacuolas (Hayden y Cobbett 2007; Verbruggen et al. 2009).

En el caso particular del níquel, se ha encontrado que existe una clara correlación entre Ni(II) y ácido cítrico (Fig. 5) en el caso de las plantas más fuertemente hiperacumuladoras de níquel de Nueva Caledonia. Niveles del ácido entre 1000-4000 μg/g son característicos de especies que contienen menos de 100 μg/g de níquel. Cuando el níquel está presente en cantidades del orden de 100-1000 μg/g, se observa un fuerte incremento en la concentración de ácido cítrico (4000-8000 μg/g) y las hiperacumuladoras de níquel muestran niveles de ácido de 8000-20000 μg/g (Lee et al. 1978). En el caso extremo del látex de Sebertia acuminata, la remoción de agua genera un

sólido que contiene un 16.7% de niquel y un 25% de citrato (Lee et al. 1978). En el látex, el níquel está presente tanto como catión [Ni(H₂O)₆]²⁺ como en forma de un complejo aniónico de citrato-niquelato (Lee et al. 1977; 1978).

Fig. 5. Estructura esquemática del ácido cítrico.

Se ha sintetizado un complejo dimérico de Ni(II)/citrato de composición $K_2[Ni(C_6H_5O_7)(H_2O)_2]_2\cdot 4H_2O$ que se presenta en forma de dímeros centrosimétricos, con cada citrato tri-ionizado unido como ligando tridentado a través del átomo de oxígeno del grupo hidroxilo, un átomo de oxígeno del carboxilato central y otro átomo de oxígeno de un carboxilato terminal. El otro carboxilato terminal actúa como puente hacia el segundo ion Ni(II). La coordinación octaédrica sobre cada uno de los cationes Ni(II) se completa con dos moléculas de agua (Baker et al. 1983). Este complejo también ha sido investigado por espectroscopia vibracional (IR y Raman) y medias de susceptibilidad magnética (Bovi-Mitre et al. 2000) y su interesante estructura se presenta en la Fig. 6.

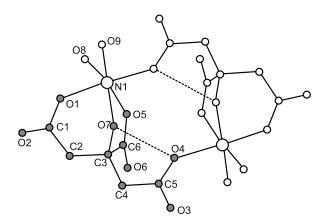


Fig. 6. Estructura esquemática del anión complejo dimérico de Ni(II)/citrato. De Baker et al. (1983).

Es interesante de mencionar que en el caso de la hiperacumuladora *Thlaspi goesingense*, el citrato fue encontrado conjuntamente con la histidina como ligandos del Ni(II) en las hojas (Krämer et al. 2000), mostrando una vez más la importancia de estos dos ligandos orgánicos en la acumulación de níquel.

Existen todavía muy pocos reportes concretos de la participación de otros ácidos orgánicos, además del ácido cítrico, en estos procesos de

hiperacumulación. Mencionaremos solo un par de ejemplos de entre los hasta ahora más claramente establecidos.

En el hiperacumulador de cadmio *Solanum nigrum* aparecen involucrados no sólo el ácido málico (Fig. 7), sino también los ácidos cítrico y acético (Sun et al. 2006). También en el caso de Zn(II), hiperacumulado por la especie *Arabidopsis halleri*, el metal se encuentra en las hojas y brotes coordinado a los ácidos málico y cítrico (Bidwell et al. 2002; Sarret et al. 2002).

Fig. 7. Estructura esquemática del ácido málico.

Por otra parte, como ya se mencionara más arriba (Secc. 2.2) en la especie *Austromyrtus bidwillii*, que es una hiperacumuladora de Mn, se ha encontrado la presencia no sólo de ácido málico, sino también de los ácidos malónico, succínico y oxálico (Bidwell et al. 2002). También en el caso de la hiperacumuladora de Ni, *Alyssum bertolonii*, se ha determinado la presencia de los ácido málico y malónico, mientras que en *Thlaspi caerulescens*, una especie hiperacumuladora de Cd, Zn y Pb el ácido málico está presente junto al ácido cítrico (Bidwell et al. 2002).

Todavía no está claro de qué manera se produce la interacción de los cationes M(II) con el ácido málico. Estudios sintéticos han mostrado que el malato puede presentar diferentes modos de coordinación frente al Zn(II) (Zhang et al. 2009).

Otra molécula orgánica muy interesante, presente en plantas es la nicotianamina (Fig. 8), el precursor de los fitosideroforos y fuertemente relacionado al metabolismo del hierro (Baran 2013), Las constantes de estabilidad de los complejos M(II)/nicotianamina siguen el ordenamiento de la bien conocida serie de Irving-Williams, esto es: Mn(II) < Fe(II) < Co(II) < Ni(II) < Cu(II) > Zn (II), mientras que el complejo de Fe(III) muestra un valor mucho más elevado (Baran, 2013).

$$CO_2H$$
 CO_2H CO_2H NH_2

Fig. 8. Estructura esquemática de la nicotianamina.

En el caso del níquel, se ha demostrado que el incremento en la biosíntesis de esta molécula aumenta la tolerancia a este elemento por parte de las plantas (Kim et al. 2005). Por otra parte, se han identificado complejos de níquel con nicotianamina por medio de métodos cromatográficos y espectrometría de masas en la planta hiperacumuladora *Thlaspi caerulescens* (Vacchina et al. 2003). En otro estudio, también se demostró que en el caso de *Sebertia acuminata*, aparte del ya bien establecido complejo de citratoniquelato (ver arriba) una pequeña fracción del níquel (~ 0.3%) es acomplejada por nocotianamina (Schaumlöffel et al. 2003).

También el fitato (*myo*-inositol hexa*quis*fosfato, Fig. 9), que primariamente es una molécula de acumulación de fósforo, parece estar involucrado en la complejación y acumulación de metales, en particular del Zn (Hayden y Cobbett 2007). Así, por ejemplo, se ha encontrado que en las raíces de *Arabidopsis halleri* y en las raíces y hojas de *Arabidopsis lyrata*, el Zn está acumulado ligado al fitato. También se ha demostrado que complejos de Mn y Zn con fitato parecen ser una forma transitoria de almacenamiento de estos dos metales en semillas en desarrollo, de diversas especies de *Arabidopsis* (Hayden y Cobbett 2007). Asimismo, ha sido demostrado, que durante la hiperacumulación de arsénico, las raíces de las plantas involucradas exudan concentraciones relativamente importantes de ácido fítico (Lu et al. 2004; Tu et al. 2017).

$$H_2O_3PO$$
 OPO_3H_2
 OPO_3H_2
 OPO_3H_2
 OPO_3H_2

Fig. 9. Estructura esquemática del ácido fítico.

Por su parte, el glutatión (Fig. 10) es uno de los mayores antioxidantes celulares y es el tiol no-proteico más abundante, tanto en plantas como en animales, siendo también el precursor de las fitoquelatinas (Baran 2012).

$$HO \longrightarrow HS \longrightarrow HO \longrightarrow O$$

Fig. 10. Estructura esquemática del glutatión.

Si bien su rol específico durante los procesos de acumulación e hiperacumulación de metales todavía no está totalmente clarificado, es evidente que puede jugar un papel de protección contra el daño oxidativo que pueden producir algunos metales (Verbruggen 2009).

Las fitoquelatinas son péptidos pequeños, ricos en cisteína, que poseen claramente un papel importante en los procesos de detoxificación de las plantas (Callahan et al. 2006; Baran 2012). Su fórmula general se muestra en la Fig. 11 y el valor de **n** usualmente está entre 2 y 5 pero puede llegar ser tan alto como 11, existiendo también algunas variantes estructurales donde el residuo de glicina es sustituido por el de algún otro amino ácido (Baran 2012).

Las fitoquelatinas están siempre presentes en todas las plantas y su biosíntesis es incrementada ante la presencia de algunos metales, por ejemplo niveles elevados de zinc o cobre. Pero también la inducen otros metales como Ag, Cd, Hg y Pb (Callahan 2006; Baran 2012).

Fig. 11. Estructura general de las fitoquelatinas.

De todas maneras, hasta ahora no se ha logrado encontrar ninguna participación de las fitoquelatinas en los procesos de hiperacumulación (Baran 2012). Otras proteínas ricas en residuos de cisteína, son las metalotioneínas (PM ~ 10 kD) que están ampliamente difundidas en la naturaleza y se encuentran tanto en plantas, como en animales y en microorganismos y su función está claramente relacionada a mecanismos de protección y detoxificación (Lippard y Berg 1994; Baran 1995) pero, también en este caso, su posible papel en los mecanismos de hiperacumulación aún no está claro (Callahan et al. 2006).

Aparentemente, existe algún tipo de diferencias en los procesos de detoxificación que ocurren en las hiperacumuladoras, en contraste a lo que sucede con especies de plantas tolerantes pero no-acumuladoras, en cuanto el empleo de ligandos de alto peso molecular, como los recién comentados, en

particular las fitoquelatinas. Esto se debe probablemente a los elevados niveles de azufre requeridos y a los prohibitivos costos metabólicos que requeriría la síntesis masiva de estos quelantes. Sin embargo, parece ser que en las hiperacumuladoras se acentúa la biosíntesis del glutatión como molécula antioxidante clave, como estrategia para reforzar el sistema antioxidante celular y minimizar los riesgos generados por las especies reactivas de oxígeno (ROS), debido al estrés inducido por la acumulación de metales (Rascio y Navari-Izzo 2011).

7. ¿De qué manera las plantas hiperacumuladoras logran esta remarcable bioacumulación de metales ?

Esta es una pregunta sumamente interesante y compleja y todavía no claramente respondida. Evidentemente existe una concurrencia de factores que permiten lograr la hiperacumulación. Sin embargo, los investigadores han identificado varias características y aspectos que son importantes para comprender y justificar este fenómeno (Chaney et al. 1997):

- 1. La planta debe ser capaz de tolerar elevados niveles del elemento en las células de raíces y brotes y tener una elevada capacidad de captación. La hipertolerancia es la propiedad clave que hace posible la hiperacumulación. Se supone que esta tolerancia resulta de la compartimentación y quelación vacuolar (Vogeli-Lange y Wagner 1990: Chaney et al. 1997; Merlot et al. 2018).
- 2. La planta debe tener la capacidad de translocar un elemento desde las raíces hacia los brotes a velocidades elevadas. Normalmente, las concentraciones de Zn, Ni o Cd en las raíces son 10 o más veces mayores que las concentraciones en los brotes, pero en las hiperacumuladoras la concentración del metal en los brotes excede los niveles de las raíces (Volgel-Lange y Wagner 1990: Brown et al. 1995; Li et al. 1996; Chaney et al. 1997; Merlot et al. 2018).
- 3. Debe haber una rápida velocidad de captación para el elemento a los niveles que ocurren en las soluciones del suelo (Chaney et al. 1997).

8. Potenciales aplicaciones prácticas de plantas hiperacumuladoras

Aparte de su interés fisiológico y ecológico, en años recientes las plantas hiperacumuladoras han recibido considerable atención debido a la posibilidad de explotar su facilidad de acumulación para ciertas aplicaciones prácticas, en particular para el desarrollo de tecnologías de fitoremediación de suelos contaminados por metales pesados o para ser utilizadas para la extracción de

metales valiosos de suelos o sitios mineralizados (fitominería) (Rascio y Navari-Izzo 2011).

8.1. Fitoremediación

La fitoremediación se refiere a la utilización de plantas para transformar a contaminantes tóxicos que se encuentran en los suelos, en especies no tóxicas. A veces es llamada también bioremediación, remediación botánica o Remediación Verde. Las categorías de la fitoremediación incluyen la fitoextracción (uso de plantas para remover contaminantes de los suelos), la fitovolatilización (uso de plantas para transformar elementos del suelo en especies químicas volátiles), la rizofiltración (uso de raíces de plantas para eliminar contaminantes de flujos de agua) y fitoestabilización (uso de plantas para para transformar metales del suelo en formas menos tóxicas, pero sin remover el metal del suelo) (Chaney et al. 1997; Pilon-Smits 2005).

A primera vista, y dado que los procesos biológicos son esencialmente dependientes de la energía solar, la fitoremediación sería desde el punto de vista económico mucho más redituables que los métodos ingenieriles clásicos como la excavación o el lavado de suelos o los tratamientos asociados a sistemas de bombeo (Pilon-Smits 2005).

Ante de avanzar un poco más en la discusión de estos procesos es conveniente aclarar algunos puntos centrales de los mismos. La eficiencia de un proceso de fitoextracción está determinado por dos factores clave: la producción de biomasa y el factor de bioconcentración del metal. Este último se define como la relación de la concentración metálica en el brote a la concentración del mismo metal en el suelo, y es una medida de la capacidad de la planta de capturar y transportar metales hacia sus brotes, que son las partes habitualmente cosechadas. Con pocas excepciones la gran mayoría de las plantas tienen factores de bioconcentración para metales o metaloides menores de 1. Para estas plantas la fitoextracción resulta imposible (McGrath y Zhao 2003). Y, en este contexto, se hace evidente que las plantas hiperacumuladoras serían excelentes candidatas para ser empleadas en estos procesos de remediación.

Sin embargo, las hiperacumuladoras también muestran un potencial limitado para la fitoremediación debido a que la mayoría de ellas son metal selectivas, no se conocen especies de este tipo para todos los elementos contaminantes de interés, usualmente sólo se los puede utilizar en sus hábitats naturales y, ante todo, tienen generalmente una baja biomasa. Usualmente, muestran también crecimientos muy lentos (Rascio y Navari-Izzo 2011).

Sin embargo hay algunas experiencias y resultados interesantes con varias de estas plantas que aparecen como promisorias para seguir explorando sus capacidades. Se sabe que varias especies de *Thlaspi* son capaces de hiperacumular más de un metal (Rascio y Navari-Izzo 2011). Experiencias con *T. caerulescens* han demostrado su potencialidad para remover Cd de suelos contaminados con bajos niveles de Cd (Robinson et al. 1998). Por su parte el helecho *Pteris vittata* que, en condiciones climáticas favorables, produce una biomasa relativamente importante, y es un buen hiperacumulador de arsénico, es capaz de acumular 22 g As/Kg de helecho seco, con un factor de bioconcentración de 87 (Ma et al. 2001; McGrath y Zhao 2003; Rascio y Navari-Izzo 2011).

Otra especie interesante, con potencial para ser utilizada en procesos de fitoremediación es la *Phytolacca acinosa*, una planta que crece muy rápidamente y tiene una biomasa importante. La misma puede acumular 19,3 g de Mn por Kg de masa seca, cuando crece en suelos ricos en manganeso (Rascio y Navari-Izzo 2011).

También se ha examinado la eficiencia del *Allysum serpyllifolium* (subespecie *lusitanicum*) para su empleo en la fitoextracción se suelos contaminados por polimetales. Esta planta puede crecer en suelos contaminados por Zn, Pb, Cu y Cr y los resultados de esos estudios sugieren que esta especie puede ser adecuada para el tratamiento de este tipo de suelos, siempre y cuando las concentraciones de cobre se mantengan debajo de los niveles fitotóxicos (Kidd y Monterroso 2005; Rascio y Navari-Izzo 2011).

Aunque el plomo permanece relativamente inmóvil en los suelos y su velocidad de extracción generalmente es baja, limitada por problemas de solubilidad y difusión hacia las raíces, el alforfón común (o trigo sarraceno) (Fagopyrum esculentum) que es una especie hiperacumuladora de Pb con elevada biomasa, puede llegar a acumular hasta 4,2 mg de plomo por gramo de masa seca de la planta (Kidd y Monterroso 2005). También se encontró que cuando se aplica al suelo la sal trisódica del agente quelante biodegradable ácido metilglicindiacético (MGDA, Fig. 12) la concentración de Pb en los brotes aumenta unas cinco veces. Estos resultados indican que esta planta puede ser considerada como un potencial fitoremediador de suelos contaminados por Pb (Tamura et al. 2005).

Fig. 12. Sal trisódica del ácido metilglicindiacético (MGDA).

Estos resultados llevan directamente a la discusión de otro aspecto interesante de estas metodologías y es la llamada fitoextracción asistida por agentes quelantes (Salt et al. 1996). En estos casos, cuando la planta extractora está creciendo y un tiempo antes de su cosecha (pueden ser días o semanas, según la planta y el metal a extraer) se agrega al suelo una cierta concentración de agente quelante tal como EDTA o ácido cítrico, que suelen notablemente la solubilidad del metal aumentar facilitar hiperacumulación (Salt et al. 1996; McGrath y Zhao 2003). Sin embargo, hay que tener en cuenta que el agregado de estos agentes quelantes sintéticos aumenta notablemente el riesgo de dispersión metálica hacia los acuíferos subterráneos. Estos riesgos limitan claramente el uso de quelantes, los que deberían solamente ser utilizados cuando se puede monitorear convenientemente el contenido metálico de los suelos y mantener un estricto control hidrológico sobre ellos (McGrath y Zhao 2003).

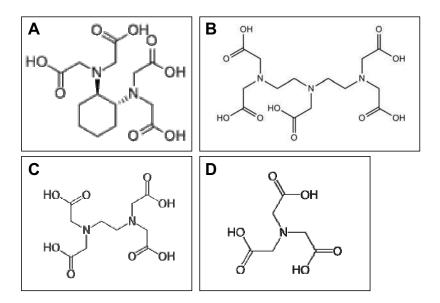


Fig. 13. Algunos agentes utilizados en la fitoextracción asistida por quelantes. A: Ácido trans-1,2 ciclohexilene-dinitro-tetraacético (CDTA). B: Ácido dietilentriamino-pentaacético (DTPA). C: Ácido etilendiamino-tetraacético (EDTA). D: Ácido nitrilo-triacético (NTA).

Además del EDTA, se han hecho ensayos con algunos otros agentes quelantes multidentados, con variado éxito y para la extracción de diferentes metales (Anderson 2000; Salt et al. 1996; Alkorta et al. 2004; Rascio y Navari-Izzo 2011) (ver Fig. 13).

Un novedoso enfoque biotecnológico para aumentar el potencial de la fitoextracción de metales, es la de mejorar la rapidez de crecimiento de hiperacumuladoras o por transferencia de genes de especies hiperacumuladoras a especies de elevada biomasa. Algunas de estas nuevas plantas transgénicas ya han mostrado excelentes resultados en diversos estudios de campo, en suelos contaminados por diferentes metales (Rascio y Navari-Izzo 2011).

Obviamente, todos estos procesos de remediación suelen ser sumamente lentos y se necesita generalmente de un tiempo prolongado y una sucesión de sembradíos y cosechas de plantas para ir disminuyendo la contaminación. De todas maneras, la metodología es de gran interés actual y está en pleno desarrollo, y en muchos lugares del mundo hay importantes grupos de investigación abocados a su mejoramiento y al pleno aprovechamiento de la misma.

8.2. Fitominería

La fitominería es la producción de una "cosecha" de un metal por crecimiento de plantas de elevada biomasa y capaces de acumular altas concentraciones metal. Algunas de ese de esas plantas hiperacumuladoras naturales y en otras, se puede inducir esa propiedad. Experimentos pioneros en este campo conducen a ubicar a estos procesos como una alternativa "verde" a las prácticas habituales de minería a cielo abierto, que suelen ser nocivas para el medio ambiente. La fitomenería, para todo un variado grupo de metales aparece como una posibilidad real, con el potencial adicional de la explotación de depósitos metalíferos cuya explotación minera resulta antieconómica, utilizando las metodologías convencionales (Brooks et 1998; Sheoran et al. 2009; Chaney et al. 2018).

Los primeros ensayos científicos de campo con esta tecnología se realizaron a mediados de los '90 en U.S. Bureau of Mines (Reno, Nevada) utilizando una arboleda natural de la especie *Streptanthus polygaloides*, que es una conocida hiperacumuladora de níquel. El suelo de la región de estudio tenía un 0,35% de Ni, claramente por debajo de la concentración económicamente viable para una explotación minera convencional. Al final de este estudio se calculó que, trabajando bajos ciertas condiciones óptimas, se podía obtener una ganancia neta de U\$S 513 por cada hectárea trabajada (Brooks et al. 1998).

Este primer ensayo fue seguido por algunos otros, en diferentes lugares del Mundo. Así, en los suelos serpentínicos de Toscana (Italia), ricos en Mg, Ni y Cr se lograron recuperar cantidades interesantes de Ni (72Kg/ha) utilizando a la hiperacumuladora *Alyssum bertolonii* y fertilizando el suelo para incrementar la biomasa. Resultados aún mejores se obtuvieron en Sudáfrica trabajando con otra hiperacumuladora de Ni, *Berkheya codii* (Brooks et al. 1998).

Estos primeros resultados, muy promisorios, alentaron a seguir explorando esta tecnología para encontrar nuevas especies de plantas aptas para la extracción de otros metales diferentes al níquel.

En la Tabla 2 se muestran ejemplos de hiperacumuladoras específicas, adecuadas para ser utilizadas en la fitominería de diferentes metales (Brooks et al. 1998; Sheoran et al. 2009). Es esperable que las especies hiperacumuladoras puedan realmente ser utilizadas para estos propósitos y, en particular, desde el punto de vista económico se presentan como especialmente adecuadas para la recuperación de los elementos talio, cobalto, uranio y níquel. Para elementos menos valiosos (p.ej. Sn o Pb) la fitominería probablemente pueda ser descartada como una opción válida. También debería seguirse explorando esta tecnología para la extracción de elementos más valiosos como oro, platino o paladio. En estos casos, se debería recurrir a la llamada hiperacumulación inducida o fitoextracción asistida por agentes quelantes, y sólo para estos metales el elevado costo de algunos de esos quelantes se compensaría fácilmente por el precio de los metales recuperados (Brooks et al. 1998).

En lo que sigue haremos algunos breves comentarios sobre la fitomenería de algunos elementos en particular, para conocer algunos detalles y aspectos adicionales relacionados a la extracción de cada uno de ellos.

Tabla 2. Plantas hiperacumuladoras específicas que podrían ser utilizadas en fitominería. Las concentraciones indican los mayores valores medios elementales (μg/g masa seca); los valores entre paréntesis son los equivalentes para plantas no-acumuladoras. La biomasa está en toneladas por hectárea por año. De: Brooks et al. (1998) y Sheoran et al. (2009). * De: Harris y Bali (2008)

Elemento	Especie	Concentración	Biomasa
Cadmio	Thlaspi caerulescens	3.000(1)	4
Cobalto	Hausmaniastrum robertii	10.200(1)	4
Cobre	Hausmaniastrum	8.356(1)	5
	katangense		
Plomo	$Th laspi\ rotundifolium$	8.200 (5)	4
Manganeso	Macadamia neurophylla	55.000 (400)	30
Níquel	$Alyssum\ bertolonii$	13.400 (2)	9
Níquel	$Berkheya\ codii$	17.000(2)	18
Oro	Brassica juncea	10 (0,001)	20
Plata*	$Brassica\ juncea$		
Selenio	$A stragalus\ pattersoni$	6.000(1)	5
Talio	Iberis intermdia	3.070(1)	8
Uranio	$A triplex\ conferti folia$	100 (0,5)	10
Zinc	$Th laspi\ calaminare$	10.000 (100)	4

8.2.1. Fitominería de talio

La creciente demanda por este elemento, y su relativamente escasa abundancia en la naturaleza, han transformado al talio en un metal prácticamente precioso desde el punto de vista económico. Se trata de un elemento sumamente tóxico, que a pesar de ello es fuertemente acumulado por diversas especies de plantas. Y esta propiedad, evidentemente puede ser utilizada para la recuperación del metal. Por otro lado, varias de estas plantas muestran coeficientes de bioacumulación relativamente elevados, lo que las hacen sumamente apropiadas para esta tecnología (Robinson y Anderson 2018).

A fines del siglo pasado se descubrió una importante hiperacumulación de talio por parte de las especies *Iberis intermedia* y *Biscutella laevigata* que crecen sobre depósitos minerales de Pb/Zn en una región cercana a Montpellier (Francia). Se encontró que *Iberis* puede acumular hasta 4.000 μg/g de Tl (medido sobre la planta entera seca) y con una biomasa de 10 ton/ha y *Biscutella* por encima de los 14.000 μg/g y una biomasa de 4 ton/ha. Resultados similares fueron obtenidos, con las mismas plantas, estudiadas en Nueva Zelandia y ambos estudios muestran que ambas plantas podrían ser potencialmente adecuadas para la aplicación comercial de esta metodología de extracción (Sheoran et al. 2009).

8.2.2. Fitominería de níquel

Ya se han mencionado más arriba los trabajos pioneros utilizando a las especies *Streptanthus polygaloides*, *Alyssum bertolonii* y *Berkheya codii*. A estos primeros trabajos podemos agregar los estudios realizados en Australia, con la especie *Hybanthus floribundus*, que llega a hiperacumular hasta 1.600 μg/g (medidos en las hojas secas de la planta), que es más del doble de los contenidos de Ni en el suelo (Anderson 2000; Sheoran et al. 2009).

Otras especies hiperacumuladoras de Ni estudiadas más recientemente, incluyen a *Alyssum murale* y *Alyssum corsicum*, capaces de acumular hasta 22.000 µg/g de Ni y que además poseen una elevada biomasa (del orden de 20 ton/ha) (Brooks et al. 1998).

Un aspecto muy interesante de comentar aquí es que la compañía minera Anglo-American Platinum Corporation (Amplats), que opera en Rustenberg (Sudáfrica) que realiza procesos de recuperación y refinado de diversos metales, encontró importante contaminación con níquel en la zona de operaciones y lanzó un proyecto para la utilización de la planta B. codii para la fitoremediación del área. La biomasa de la planta fue colectada e incinerada y el bio-mineral fue luego fundido. El metal crudo fue refinado y moldeado en forma de pequeños lingotes, conteniendo predominantemente níquel. Esta fue la primera demostración, a nivel mundial, de que el metal recuperado a través de una hiperacumuladora puede ser efectivamente obtenido en forma relativamente pura (Sheoran et al. 2009).

8.2.3. Fitominería de cobalto

Ya se mencionó arriba, que el cobalto y el cobre muchas veces se acumulan conjuntamente en diversas plantas, pero también se han encontrado plantas que hiperacumulan cobalto conjuntamente con níquel (Sheoran et al. 2009). En el caso de *Berkheya codii* se encontró que el cobalto se acumula fácilmente con o sin la simultánea presencia de níquel, pero la captación de este último metal es inhibida por la presencia de una concentración igual de cobalto. Además, el cobalto parece ser fitotóxico para esta planta, con el aumento de su concentración, y decrece notablemente la producción de biomasa (Keeling et al. 2003).

Un ejemplo interesante se encontró en la recientemente descubierta especie *Glochidion cf. sericeum*, que es una planta mediana que alcanza los 5-8 m de altura, con un tronco de unos 12 cm de diámetro y que hasta el presente ha sido descripta en una sola localidad de Malasia (Serenisim, en la parte norte del Parque Kinabalu, en Sabah). Esta planta puede acumular simultáneamente Ni y Co en una cantidad del orden de 1.500 μg/g en las hojas, y en una relación Ni : Co = ~1, comparada con otras plantas

hiperacumuladoras de Ni donde esta relación Ni : $\text{Co} = \sim 475$ (van der Ent et al. 2018a). En esta planta el Ni parece estar complejado por citrato como ligando principal mientras que el Co aparentemente está coordinado a malato (van der Ent et al. 2018a).

Como ya se mencionara también anteriormente, la especie *Haumaniastrum robertii* es hasta ahora la mayor hiperacumuladora de cobalto conocida, aunque acumula también cobre en forma simultánea. De todas maneras, la acumulación de Co supera en más de 10 veces a la de Cu (van der Ent et al. 2019).

8.2.4. Fitominería de selenio

Las especies *Stranleya pinnata*, *Astragalus bisculcatus* y *Cardamine hupingshanensi* son capaces de extraer grandes cantidades de selenio de suelos y además las dos primeras muestran un elevado factor de bioconcentración (> 100, para ambas) y por lo tanto han sido sugeridas como potencialmente útiles para la extracción de este elemento (Zambrano et al. 2018). La primera de ellas, miembro perenne de la familia Brassicaceae, crece en la zona oeste de Norteamérica, alcanza alturas de hasta 1,5 m con un diámetro de unos 2 m y por lo tanto posee una elevada biomasa, pudiendo llegar a acumular entre 2000 y 5000 μg/g de Se (Zambrano et al. 2018). Las hojas llegan a acumular hasta 3.500 μg/g de Se en la primavera y el contenido de Se baja considerablemente en las hojas viejas, durante el otoño (Zambrano et al. 2018).

Por su parte, *A. bisculatus*, un miembro de la familia Fabaceae, es también una planta nativa de Norteamérica, pero posee una biomasa bastante menor que *S. pinnata*, sin embargo es un fuerte hiperacumulador, llegando a acumular hasta 10.000 μg/g de Se en sus hojas jóvenes y muestra también variaciones estacionales importantes (Zambrano et al. 2018).

Estudios de especiación mostraron que la forma predominante de selenio orgánico en las hojas jóvenes, tanto en *S. pinnata* como en *A. Bisculcatus* es la metilselenocisteína, mientras que en *C. hupingshaneni* predomina la selenocistina (Zambrano et al. 2018). Esta última especie, fue recientemente descubierta en Enshi, en el oeste de Hubei, China y es capaz de acumular más de 1900 µg/g de Se en sus brotes (Zambrano et al. 2018).

8.2.5. Fitominería del oro

Este metal aparece como un buen candidato a ser recuperado por metodologías de fitominería, dada su baja concentración en muchos suelos. Las plantas habitualmente no acumulan oro, así que el metal debe ser solubilizado de alguna manera para que su captación pueda tener lugar (Sheoran et al. 2009; Robinson y Anderson 2018).

Los primeros resultados obtenidos en estudios de campo por Anderson et al. a fines del siglo pasado, utilizando la llamada mostaza de India (*Brassica juncea*), una planta de rápido crecimiento y gran biomasa, y empleando tiocianato de amonio para inducir la hiperacumulación, fueron bastante prometedores (Anderson et al. 1998; Brooks et al. 1998), obteniéndose en diferentes experimentos entre 9 y 19 µg/g de Au (referidos a la planta seca) (Anderson et al. 1998).

En otros experimentos de campo realizados posteriormente, en colaboración con la Compañía Vale do Rio Doce en la mina Fazenda Brasileira (Bahia), y trabajando otra vez con *Brassica juncea* y también con *Zea mays*, Anderson y colaboradores lograron demostrar una excelente capacidad de hiperacumulación para la primera especie, en este caso, utilizando cianuro de sodio como agente inductor, llegando a obtener una concentración de oro del orden de 39 μg/g de Au (Keeling et al. 2003; Anderson et al. 2005). En conclusión, este y otros trabajos permiten predecir que si se logra recuperar 1 Kg de oro por hectárea de planta sembrada, la operación resulta económicamente viable, siempre y cuando el contenido de oro del suelo sea al menos de 2 g/ton (Anderson et al. 2005).

Hasta el presente, se han realizado experiencias de laboratorio y de campo con más de veinte especies de plantas, encontrándose que las seis especies más adecuadas para ser utilizadas en la fitominería del oro serían las siguientes: *Kalanchoe serrata*, *Brassica juncea*, *Chilopsis linearis*, *Brassica campestris*, *Heliantus annuus* y *Bothriochloa macra* (Wilson-Corral et al. 2012).

9. Algunos comentarios finales sobre fitoremediación y fitominería

Los análisis precedentes muestran claramente el potencial que el empleo de plantas hiperacumuladoras posee para encarar nuevas tecnologías para la remediación de suelos contaminados o para la extracción y recuperación de diversos metales. La selección de las plantas más adecuadas para estos fines debe hacerse teniendo en cuenta las características del entorno geográfico donde se aplicarán. Es evidente, que muchas plantas captan metales que se encuentran en solución, siempre que las condiciones geoquímicas sean las adecuadas. La mejor elección será una especie, tanto nativa como exótica, que sea resistente, que tolere condiciones extremas de temperatura, estrés hídrico, acidez y salinidad. Además, debería tener una elevada biomasa y mostrar un crecimiento muy rápido (Anderson 2000; Chaney et al. 2018).

Por otra parte, el área a ser utilizada para el trabajo debería ser inicialmente acondicionada convenientemente de manera tal de obtener las condiciones geoquímicas adecuadas que favorezcan el desarrollo de la planta y faciliten la fitoextracción. Recién después de esta adecuación debería iniciarse la plantación o deposición de semillas en la zona. Luego, se debería comenzar con la irrigación del área, con el agregado o no, de fertilizantes y/o reactivos inductores. Una vez terminado el proceso de hiperacumulación, las plantas son cosechadas e incineradas y el metal puede ser finalmente recuperado (Anderson 2000; Chaney et al. 2018).

Este último aspecto, la recuperación del metal, está adquiriendo también creciente atención durante los últimos años ya que deben encontrarse opciones adecuadas a las características únicas de la biomasa de las plantas acumuladores. En este contexto, debe determinarse la mejor manera de extraer el metal de interés de la planta que lo acumuló y luego recurrir a los procesos piro- o hidro-metalúrgicos adecuados para su refinado (Simonnet et al. 2018).

Desde el punto de vista económico, estas operaciones dependen de varios factores, tales como el contenido de metal en el suelo y en la planta, la producción de biomasa anual y la posibilidad de recuperar parte de inversión a través de la energía generada en la combustión de la biomasa. Y, en el caso de la fitominería la ecuación final estará fuertemente dominada por el valor mundial del metal a recuperar (Sheoran et al. 2009; Rascio y Navari-Izzo 2011).

Una gran parte de las investigaciones realizadas hasta el presente sobre estas temáticas fueron desarrolladas a escala de laboratorio y en condiciones de trabajo relativamente controladas, por períodos breves de tiempo. Es obvio que para poder avanzar en el uso de estas tecnologías serán necesarios mayores trabajos en condiciones de campo y a escala comercial. Asimismo, es importante abordar las mismas en forma multidisciplinaria, combinando biología vegetal, ingeniería genética, ingeniería ambiental, química de suelos y microbiología (Sheoran et al. 2009; Rascio y Navari-Izzo 2011). Recientemente, diversos autores han acuñado el nuevo término *Agrominería* para reflejar la entera cadena de procesos de la producción de metales de valor económico, a partir del cultivo de plantas en entornos metalíferos (van der Ent et al. 2018b).

Finalmente, vale la pena remarcar que a pesar de los muy prometedores resultados obtenidos a partir de algunos de los estudios de campo ya realizados, hasta el presente no se han reportado todavía operaciones de fitominería comercialmente exitosas, realizadas de manera continuada (Rascio y Navaro-Izzi 2011). Hasta ahora, el único emprendimiento comercial claramente establecido parece ser la extracción de níquel, en Albania, mediante la utilización del *Allysum murale* (Bani et al. 2007), así como el

inicio de tareas similares en Malasia utilizando *Phyllanthus securinegioides* (Chaney et al. 2018). Y lo mismo parece suceder hasta ahora con la fitoremediación, cuya aplicación continuada es todavía relativamente limitada (Sharma y Pandey 2014). Pero evidentemente, es una cuestión de tiempo y de nuevos esfuerzos multidisciplinarios, convenientemente organizados y combinados, para que estas tecnologías puedan ser debidamente aprovechadas (Rascio y Navaro-Izzi 2011; Chaney et al. 2018).

Referencias

- Alkorta I, Hernández-Allica J, Becerril JM, Amezaga I, Albiza I, Onaindia M, Garbisu C (2004) Chelate-enhanced phytoremediation of soils polluted with heavy metals. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 3:55-70.
- Anderson CWN (2000) Practical aspects of phytoremediation. PhD Thesis, Massey University, Palmerston North, New Zealand.
- Anderson CWN, Brooks RR, Stewart RR, Simcock R (1998) Gold uptake by plants. Gold Bulletin, 32:48-52.
- Anderson C, Moreno F, Meech J (2005) A field demonstration of gold phytoextraction technology. Minerals Engineering, 18:385-392.
- Baker AJM (1981) Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. Journal of Plant Nutrition, 3:643-654.
- Baker EM, Baker HM, Anderson BF, Reeves RD (1983) Chelation of nickel(II) by citrate. The crystal structure of a nickel-citrate complex $K_2[Ni(C_6H_5O_7(H_2O)_2].4H_2O$. Inorganica Chimica Acta, 78: 281-285.
- Balafrej H, Bogusz D, Triqui ZEA, Guedira A, Bendaou N, Smouni A, Fahr M (2020). Zinc hyperaccumulation in plants: A review. Plants, 9:562.
- Bani A, Echevarría G, Sulce S, Morel JL, Mullai A (2007) In-situ phytoextraction of Ni by a native population of *Alyssum murale* on an ultramafic site (Albania). Plant and Soil, 293:79-89.
- Bani A, Pavlova D, Echevarría G, Mullaj A, Reeves RD, Morel JL, Sulce S (2010) Nickel hyperaccumulation by the species *Alyssum* and *Thlaspi* (Brassicaceae) from the ultramafic soils of the Balkans. Botanica Serbica, 34:3-14.
- Baran EJ (1995) Química bioinorgánica, McGraw Hill Interamericana de España S.A., Madrid.
- Baran EJ (2012) Phytochelatins: Natural chelating agents involved in plant protection. En: Hemantaranjan H. (ed.) Advances in plant physiology, vol. 13. Scientific Publishers, Jodhpur, pp. 389-414.
- Baran EJ (2013) Phytosiderophores and related systems: metal uptake by plants. En: Hemantaranjan H. (ed.) Advances in plant physiology, vol. 14. Scientific Publishers, Jodhpur, pp. 1-27.
- Berazaín-Iturralde R (1999) Estudios en plantas acumuladoras e hiperacumuladoras de níquel en las serpentinas del Caribe. Revista del Jardín Botánico Nacional (Cuba), 20:17-30.
- Bidwell SD, Woodrow IE, Batianoff GN, Sommer-Knudsen J (2002) Hiperaccumulation of manganese in the rainforest tree *Austromyrtus bidwillii* (Myrtaceae) from Queensland, Australia. Functional Plant Biology, 29:899-905.
- Bovi Mitre MG, Wierna NR, Wagner CC, Baran EJ (2000) Spectroscopic and magnetic properties of a Ni(II) complex with citric acid. Biological Trace Element Research, 76:183-190.
- Brooks RR (1977) Copper and cobalt uptake by Haumaniastrum species. Plant and Soil, 48:541-544.
- Brooks RR, Lee J, Reeves RD, Jaffré T (1977) Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. Journal of Geochemical Exploration, 7:49-57.
- Brooks RR, Morrison RS, Reeves RD, Dudley TR, Akam Y (1979) Hyperaccumulation of nickel by *Alyssum* Linnaeus (Cruciferae). Proceedings of the Royal Society B, 203:387-403.
- Brooks RR (1994) Plants that hiperaccumulate heavy metals. En: Farago ME (ed.) Plants and the chemical elements. Verlag Chemie, Weinhein, pp. 87-115.
- Brooks RR, Chambers MF, Nicks LJ, Robinson BH (1998) Phytomining. Trends in Plant Science, 3:359-362
- Brown SL, Caghaney RL, Angle SJ, Baker AJM (1995) Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solutions. Soil Science Society of America Journal, 59:125-133.

- Callahan DL, Baker AJM, Kolev SD, Wedd AG (2006) Metal ion ligands in hyperaccumulating plants. Journal of Biological Inorganic Chemistry, 11:2-12.
- Chaney RL, Malikz, Li YM, Brown SL, Brewer EP, Angle JS, Baker AJM (1997). Phytoremediation of soil metals. Current Opinion in Biotechnology, 8:279-284.
- Chaney RL, Baker AJM, Morel JL (2018) The long road to developing agromining/phytomining. En: van der Ent A, Echevarría G, Baker AJM, Morel JL (eds.) Agromining: Farming for metals, Springer, New York, pp. 1-17.
- Fernando DR, Woodrow IE, Jaffré T, Dumontet V, Marshal AT, Baker AJM (2008) Foliar manganese accumulation by *Maytenus founieri* (Celastraceae) in its native Caledonian habitats: populational variation and localization by X-ray microanalysis. New Phytologist, 177:178-185.
- Fraser KA, Harding MM (1967) The crystal and molecular structure of bis(histidinato)nickel(II) monohydrate. Journal of the Chemical Society, A1967:415-420.
- Freeman JL, Zhang LH, Marcus MA, Fakra S, McGrath SP, Pilon-Smits EHA (2006) Spatial imaging, speciation, and quantification of selenium in the hyperaccumulator plants *Astragalus bisulcatus* and *Stanleya pinnata*. Plant Physiology, 142:124-134.
- Fu JW, Liu X, Han YH, Mei H, Cao Y, de Oliveira L, Liu Y, Rathinasabapathi B, Cheng Y, Ma LQ (2017). Arsenic-hyperaccumulator *Pteris vittata* efficiently solubilized phosphate rock to sustain plant growth and As uptake. Journal of Hazardous Materials, 330:68-75.
- Galeas ML, Zhang LH, Freeman JL, Wegner M, Pilon-Smits EHA (2007) Seasonal fluctuations of selenium and sulfur accumulation in selenium hyperaccumulators and related non-accumulators. New Phytologist, 173:517-525.
- Ginocchio R, Baker AJM (2004) Metallophytes in Latin America: a remarkable biological and genetic resource scarcely known and studied in the region. Revista Chilena de Historia Natural, 77:185-194
- Harris AT, Bali R (2008) On the formation and extent of uptake of silver nanoparticles by live plants. Journal of Nanoparticle Research, 10:691-695.
- Haydon MJ, Cobbett CS (2007) Transporters of ligands for essential metal ions in plants. New Phytologist, 174:499-506.
- Jaffré T, Brooks RR, Lee J, Reeves RD (1976) Sebertia acuminata: A hyperaccumulator of nickel from New Caledonia. Science, 193:579-580.
- Jaffré T, Reeves RD, Baker AJM, Shat H, van der Ent A (2018) The discovery of nickel hyperaccumulation in the New Caledonian *Pycnandra acuminata* 40 years on: an introduction to a virtual issue. New Phytologist, 218:397-400.
- Kabata-Pendias A (2011) Trace elements in soils and plants, 4th.Edit., CRC-Press, Boca Raton (USA).
- Keeling SM, Stewart RB, Anderson RB, Robinson BH (2003) Nickel and cobalt phytoextraction by the hyperaccumulator *Berkheya coddii*: Implications for polymetallic phytomining and phytoremediation. International Journal of Phytoremediation, 5:235-244.
- Kidd PS, Monterroso C (2005) Metal extraction by *Alyssum serpyllifolium* ssp. *lusitanicum* on minespoil soils from Spain. Science of the Total Environment, 226:1-11.
- Kim S, Takahashi H, Higuchi K, Tsunoda K, Nakanishi H, Yoshimura E, Mori S, Nishizawa NK (2005) Increased nicotianamide biosynthesis confers enhanced tolerance of high levels of metals, in particular nickel, to plants. Plant & Cell Physiology, 46:1809-1818.
- Krämer U, Cotter-Howells JD, Charnock JM, Baker AJM, Smith JAC (1996). Free histidine as a metal chelator in plants that accumulate nickel. Nature, 379:635-638.
- Krämer U, Pickering IJ, Prince RC, Raskin I, Salt DE (2000) Subcellular localization and speciation of nickel in hyperaccumulator and non-accumulator *Thlaspi* species. Plant Physiology, 122:1343-1354
- Krämer U (2010) Metal Hyperaccumulation in Plants. Annual Review of Plant Biology, 61:517-534.
- LaCoste C, Robinson BH, Brooks RR, Anderson C, Chiarucci A, Leblanc M (1999) The phytoremediation potential of thallium-contaminated soils using *Iberis* and *Biscutella* species. International Journal of Phytoremediation, 1:327-338.
- Lai Y, Wang Q, Yang L, Huang B (2006). Subcellular distribution of rare earth elements and characterization of their binding species in a newly discovered hyperaccumulator *Pronephrium simplex*. Talanta, 70:26-31.
- Lee J, Reeves RD, Brooks RR, Jaffré T (1977) Isolation and identification of a citrate-complex of nickel from nickel-accumulating plants. Phytochemistry, 16:1503-1505.
- Lee J, Reeves RD, Brooks RR, Jaffré T (1978) The relation between nickel and citric acid in some nickel-accumulating plants. Phytochemistry, 17:1033-1035.
- Li YM, Chaney RL, Angle JS, Chen KY, Kerschner BA, Baker AJM (1996) Genotypical differences in zinc and cadmium hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens*. Agronomic Abstracts, 1996:27.
- Lippard SJ, Berg JM (1994) Principles of bioinorganic chemistry. University Science Books, Mill Valley (USA).

- Liu C, Yuan M, Liu WS, Guo MN, Huot H, Tang YT, Laubie B, Simonnot MO, Morel JL, Qiu RL (2018) Element Case Studies: Rare Earth Elements. En: van der Ent A, Echevarría G, Baker AJM, Morel JL (eds.) Agromining: Farming for metals, Springer, New York (USA), pp. 297-308.
- Ma LQ, Komar KM, Tu C, Zhang W, Cai Y, Kennelley ED (2001) A fern that hyperaccumulates arsenic. Nature, 409:579.
- McGrath SP, Zhao FJ (2003) Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. Current Opinion in Biotechnlogy, 14:277-282.
- Malaisse F, Grégoire J, Brooks RR, Morrison RS, Reeves RD (1978) *Aeolanthus biformifolius* De Wild: A hyperaccumulator of copper from Zaire. Science, 199:887-888.
- Martell AE, Smith RM (eds.) (1974) Critical Stability Constants. Plenums Press, New York (USA), pp. 1-604.
- Merlot S, Sánchez García de la Torre V, Hanikenne M (2018) Physiology and molecular biology of trace element hyperaccumulation. En: van der Ent A, Echevarría G, Baker AJM, Morel JL (eds.) Agromining: Farming for metals, Springer, New York (USA), pp. 93-116.
- Mesjasz-Przybylowicz J, Nakonieczny M, Migula P, Agustiniak M, Tarnawska M. Reimold WU, Koeberl C, Przybylowicz W, Glowacka E (2004). Uptake of cadmium, lead, nickel and zinc from soil and water solutions by the nickel hyperaccumulator *Berkheya coddii*. Acta Biologica Cracoviensia, Series Botanica, 46:75-85.
- Perrier N, Colin F, Jaffré T, Ambrosi JP, Rose J, Bottero JY (2004) Nickel speciation in *Sebertia acuminata*, a plant growing on a lateritic soil of New Caledonia. Comptes Rendus Geoscience, 336:567-577.
- Pilon-Smits E (2005) Phytoremediation. Annual Reviews in Plant Biology, 56:15-39.
- Rascio N, Navari-Izzo F (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? Plant Science, 180: 169-181.
- Reeves RD, Brooks RR, Press JR (1980) Nickel accumulation by species of *Peltaria Jacq*. (Cruciferae). Taxon, 29:629-633.
- Reeves RD, Brooks RR (1983) Hyperaccumulation of lead and zinc by two metallophytes from mining areas of Central Europe. Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological, 31:277-285.
- Reeves RD, Baker AJM (1984) Studies on metal uptake by plant from serpentine and non-serpentine populations of *Thlaspi Goesingense* Hálácsy (Crycuferae). New Phytologist, 98:191-204.
- Reeves RD, Baker AJM, Borhidi A, Berazain R (1996) Nickel-accumulating plants from the ancient serpentine soils of Cuba. New Phytologist, 133:217-224.
- Reeves RD, Baker AJM, Borhidi A, Berazaín R (1999) Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba. Annals of Botany, 83:29-38.
- Reeves RD, Schwarz C, Morel JL, Edmonston J (2001). Distribution and metal-accumulating behavior of *Thlaspi caerulescens* and associated metallophytes in France. International Journal of Phytoremediation, 3:145-172.
- Reeves RD, Baker AJM, Becquer T, Echevarría G, Miranda ZJG (2007) The flora and biogeochemistry of the ultramafic soils of Goiás state, Brazil. Plant and Soil, 293:107-119.
- Reeves RD, Baker AJM, Jaffré T, Erskine PD, Echevarria G, van der Ent A (2018) A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements. New Phytologist, 218:407-411
- Robinson B, Anderson C (2018) Element case studies: Thallium and noble metals. En: van der Ent A, Echevarría G, Baker AJM, Morel JL (eds.) Agromining: Farming for metals. Springer, New York (USA), pp. 253-261.
- Robinson BH, Leblanc N, Petir D, Brooks RR, Kirkman JH, Gregg PEH (1998) The potential of *Thlaspi* caerulescens for phytoremediation of contaminated soils. Plant and Soil, 203:47-56.
- Römheld V (1991) The role of phytosiderophores in acquisition of iron and other micronutrients in graminaceous species: An ecological approach. Plant and Soil, 130:127-134.
- Sagner S, Kneer R, Wanner G, Cosson JP, Deus-Neumann B, Zenk MH (1998) Hyperaccumulation, complexation and distribution of nickel in *Sebertia acuminata*. Phytochemistry, 47:339-347.
- Salt DE, Smith RD, Raskin I (1996) Phytoremediation. Annual Review in Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 49:643-668.
- Sarret G, Saumitou-Laprade P, Bert V, Poux O, Hazemann JL, Traverse A, Marcus MA, Manceau A (2002) Forms of zinc accumulation in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. Plant Physiology, 130:1815-1826.
- Schaumlöffel D, Ouerdane L, Bouyssiere B, Lobinski R (2003) Speciation analysis of nickel in the latex of a hyperaccumulating tree *Sebertia acuminata* by HPLC and CZE with ICP MS and electrospray MS-Ms detection. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 18:120-127.
- Schiavon M y Pilon-Smits EAH (2017) The fascinating facets of plant selenium accumulation biochemistry, physiology, evolution and ecology. New Phytologist, 213:1582-1596.

- Shan X, Wang H, Zhang S, Zhou H, Zheng Y, Yu H, Wen B (2003) Accumulation and uptake of light rare earth elements in a hyperaccumulator *Dicropteris dichotoma*. Plant Science, 165:1343-1353.
- Sharma P, Pandey S (2014) Status of phytoremediation in world scenario. International Journal of Bioremediation and Biodegradation, 2:178-191.
- Sheoran V, Sheoran AS, Poonia P (2009) Phytomining: A review. Minerals Engineering, 22:1007-1019.
 Simonnot MO, Vaughan J, Lauvie B (2018) Processing bio-ore to products. En: van der Ent A,
 Echevarría G, Baker AJM, Morel JL (eds.) Agromining: Farming for metals, Springer, New York (USA), pp. 39-51.
- Stein RJ, Höreth S, de Melo JRF, Sylwasshy L, Lee J, Garbin ML, Clemens S, Krämer U (2017) Relationships between soil and leaf mineral composition are element-specific, environment dependent and geographically structured in the emerging model *Arabidopsis halleri*. New Phytologist, 213:1274-1286.
- Sun R, Zhou Q, Jin C (2006) Cadmium accumulation in relation to organic acids in leaves of *Solanum nigrum* L. as a newly found cadmium hyperaccumulator. Plant and Soil, 285:125-134.
- Szabó-Plánka T, Rockenbauer A, Korecz L, Nagy D (2000) An electron spin resonance study of coordination modes in the copper(II) histamine and copper(II)-L-histidine systems in fluid aqueous solution. Polyhedron, 19:1123-1131.
- Tamura H, Honda M, Sato T, Kamachi H (2005) Pb hyperaccumulation and tolerance in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). Journal of Plant Research, 118:355-359.
- Treeby M, Marschner H, Römheld V (1989) Mobilization of iron and other micronutrient cations from a calcareous soil by plant-borne, microbial, and synthetic metal chelators, Plant and Soil, 114:217-226.
- Tu S, Ma L, Luongo T (2004) Root exudates and arsenic accumulation in arsenic hyperaccumulating *Pteris vittata* and non-hyperaccumulating *Nephrolepsis exaltata*. Plant and Soil, 258:9-19.
- Vacchina V, Mari S, Czernic P, Marqués L, Pianelli K, Schaumlöffel D, Lebrun M, Lobinski R (2003) Speciacition of nickel in a hyperaccumulating plant by high-performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry and electrospray MS/MS assisted by cloning using yeast complementation. Analytical Chemistry, 75:2740-2745.
- van der Ent A, Baker AJM, Reeves RD, Pollard AJ, Schat H (2013). Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: Facts and fictions. Plant and Soil, 362:219-334.
- van der Ent A, Mak R, de Jonge MD, Harris HH (2018a) Simultaneous hyperaccumulation of nickel and cobalt in the three *Glochidion* cf. *sericeum* (Phyllantaceae): elemental distribution and chemical speciation. Scientific Reports 8: art.9683
- van der Ent A, Echevarría G, Baker AJM, Morel JL (eds.) (2018b) Agromining: farming for metals. Springer, New York (USA).
- van der Ent A, Malaisse F, Erskine PD, Mesjasz-Przybylowicz J, Przybylowicz WJ, Barnabas AD, Sisnicka M, Harris HH (2019) Abnormal concentration of Cu-Co in *Hausmaniastrum katangense*, *Hausmaniastrum robertii* and *Aeolanthus biformifolius*: contamination or hyperaccumulation? Metallomics, 11:586-596.
- Verbruggen N, Hermans C, Schat H (2009) Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. New Phytologist, 181:759-776.
- Vogeli-Lange R, Wagner GJ (1990) Subcellular localization of cadmium and cadmium-binding peptides in tobacco leaves. Plant Physiology, 92:1086-1093.
- Wang SL, Liao WB, Yu FQ, Liao B, Shu WS (2009) Hyperaccumulation of lead, zinc, and cadmium in plants growing on a lead/zinc outcrop in Yunnan Province, China. Environmental Geology, 58:471
- Wei X, Zhou Y, Tsang DCW, Song L, Zhang C, Yin M, Liu J, Xiao T, Zhang G, Wang J (2020) Hyperaccumulation and transport mechanism of thallium and arsenic in brake ferns (*Pteris vittata* L.): A case study from mining area. Journal of Hazardous Materials, 388:121756.
- White PJ (2016) Selenium accumulation by plants. Annals of Botany 117:217-235.
- Wilson-Corral V, Anderson CWN, Rodríguez-López M (2012) Gold phytomining. A review of the relevance of this technology to mineral extraction in the 21st century. Journal of Environmental Management, 111:249-257.
- Wu C, Liao B, Wang SL, Zhang J, Li JT (2010). Pb and Zn accumulation in a Cd- hyperaccumulator (*Viola Baoshanensis*). International Journal of Phytoremediation, 12:574-585.
- Xue SG, Chen YX, Reeves RD, Baker AJM, Lim Q, Fernando DR (2004) Manganese uptake and accumulation by the hyperaccumulator plant *Phytolacca acinosa* Roxb. (Phytolaccaceae). Environmental Pollution, 131:393-399.
- Yang SX, Deng H, Li MS (2008) Manganese uptake and accumulation in a woody hyperaccumulator, *Schima superba*. Plant, Soil and Environment, 54:441-446.

- Zambrano MC, Yun L, Yin X, Bañuelos G (2018) Element case studies: Selenium. En: van der Ent A, Echevarría G, Baker AJM, Morel JL (eds.) Agromining: Farming for metals, Springer, New York (USA), pp. 241-251.
- Zhang RH, Hong QM, Yang JM, Zhang HLA Blackburn GM, Zhou ZH (2009). Syntheses, spectroscopies and structures of zinc complexes with malate. Inorganica Chimica Acta, 362:2643-2649.



Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Argentina Tomo 72, 2021

LOTHAR MEYER: EL OTRO DESCUBRIDOR DEL SISTEMA PERIÓDICO DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS

Enrique J. Baran

Académico Emérito de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

E-mail: baran@quimica.unlp.edu.ar

Palabras clave

Lothar Meyer Mendeleev Sistema Periódico de los Elementos Propiedades periódicas

Keywords

Lothar Meyer Mendeleev Periodic System of the Elements Periodic properties Resumen El sistema periódico de los elementos fue desarrollado independientemente y en forma casi simultánea por Lothar Meyer en Alemania y Dimitri Mendeleev en Rusia. Pero, como Meyer publicó sus resultados un año después que Mendeleev, el descubrimiento del Sistema Periódico ha quedado siempre ligado sólo al nombre del científico ruso. Lothar Meyer fue un médico y químico alemán que hizo contribuciones relevantes para el avance de la Ciencia durante el s. XIX, y este año recordamos el 190 aniversario de su nacimiento. Por lo tanto, este artículo puede ser considerado como un homenaje a su personalidad y a sus logros mostrando también sus particulares visiones sobre el ordenamiento periódico de los elementos químicos.

Abstract Lothar Meyer: The other discoverer of the periodic system of the chemical elements. The periodic system of the elements was developed independently and almost simultaneously by Lothar Meyer in Germany and Dimitri Mendeleev in Russia. However, as Meyer published his results one year later than Mendeleev, the discovery of the Periodic System remained always related only to the name of the Russian scientist. Lothar Meyer was a German physician and chemist which made important contributions to the advancement of science during the XIXth. century, and this year we remember his 190th birthday. Therefore, this article may be considered as a tribute to his personality and achievements and gives an insight into his particular visions on the periodic ordering of the chemical elements.

1. Introducción

Durante el año pasado celebramos, por proclamación de la Asamblea General de las Naciones Unidas, el Año Internacional de la Tabla Periódica. ya que durante 2019 se cumplió el 150 aniversario del descubrimiento del Sistema Periódico de los Elementos Químicos por el científico ruso Dimitri Ivánovich Mendeleev (1834-1907),descubrimiento que indudablemente, uno de los logros más significativos de la Ciencia moderna. Efectivamente, el Sistema Periódico es, tanto desde la teoría como de la práctica una de las herramientas fundamentales y más preciosas desarrollada por el genio humano. Diariamente ayuda a la orientación del estudiante y muestra al científico experimentado nuevas rutas y caminos en la investigación, apoyando continuadamente el ordenamiento sistemático de la Química en su conjunto y en todos sus matices (Baran 2019).

Pero lo que no siempre se recuerda es que, en forma independiente de los trabajos de Mendeleev, el médico y químico alemán Lothar Meyer llegó a establecer el mismo ordenamiento, en forma casi simultánea. Pero, por haber publicado sus resultados unos meses más tarde que el sabio ruso, así como por otras circunstancias ocurridas posteriormente, el descubrimiento quedó por siempre ligado solamente al nombre de Mendeleev.

Dado que este año se cumplen 190 años del nacimiento de Meyer, parece muy oportuno volver a recordar su figura y resaltar también sus logros y visiones particulares sobre el ordenamiento periódico de los elementos químicos.

2. Breve bosquejo biográfico

Julius Lothar Meyer (Fig. 1) nació en Varel and der Jade (Gran Ducado de Oldenburg, Baja Sajonia, Alemania) el 19 de agosto de 1830 (las fuentes para este bosquejo biográfico fueron: Weeks 1932; Boeck 2019).

Su padre, Heinrich Friedrich August Jakob Meyer era médico y de su matrimonio con Anna Sophie Wilhelmine Biermann, nacieron ocho hijos, de los cuales sólo cuatro llegaron a la adultez. Luego de finalizar sus estudios medios en el Antiguo Gimnasio de Oldenburg en 1851, Lothar decidió seguir las huellas de su padre y estudiar Medicina. A partir de ese mismo año y hasta 1853 cursó materias médicas, pero también tomó cursos de Química, Física, Geología y Botánica en la Universidad de Zürich. Seguidamente, se trasladó a Würzburg, donde en 1854 presentó su Tesis de Doctorado obteniendo el grado de Dr. en Medicina. Sin embargo, ya en ese momento había empezado a sentir una fuerte atracción por la Química, por lo cual al año siguiente se trasladó a Heidelberg para trabajar con Robert Bunsen (1811-1899), dedicándose especialmente a estudios con gases.



Fig. 1. Julius Lothar Meyer.

Durante 1856/57 se radicó en Königsberg, para asistir a los cursos de electromagnetismo del físico Franz Ernst Neumann (1798-1895) y allí continuó además trabajando en problemas de fisiología en el laboratorio de Gustav Werther (1815-1869). Con los resultados de estos estudios publicó un trabajo sobre el efecto del monóxido de carbono sobre la sangre el que presentó como Tesis a la Universidad de Breslau, con la cual obtuvo, en 1858, el grado de *Dr. phil.*, y al año siguiente logró la habilitación docente, en esa misma Universidad, presentando un escrito titulado "Sobre las Enseñanzas Químicas de Berthollet y Berzelius". Inmediatamente, fue puesto a cargo del laboratorio químico del Instituto de Fisiología de la Universidad de Breslau, donde dictó clases sobre Química de plantas y animales, fotoquímica, análisis de gases y los cursos básicos de Química Orgánica e Inorgánica.

Después del Primer Congreso Internacional de Química, realizado en Karlsruhe en septiembre de 1860 (ver Secc. siguiente) y del que Lothar Meyer participó personalmente, se sintió fuertemente atraído por diversos aspectos teóricos de la Química, planeando de inmediato la escritura de un libro que permitiera clarificar diversos aspectos y cuestiones que se venían discutiendo en la época. Este fue, sin embargo, un trabajo lento, muy meticuloso y pensado y terminó con su redacción recién en 1864, año en que fue publicado con el título "Las Modernas Teorías de la Química y su Significado para la Estática Química". En este trabajo siguió invirtiendo muchos esfuerzos y lo fue ampliando y extendiendo en forma continuada, produciendo cuatro ediciones posteriores del mismo (1872, 1876, 1883 y 1884), la última de las cuales alcanzó a superar las 600 páginas.

El mismo año en que se publicó la primera edición de su obra, su hermano Oskar Emil (1834-1909) que también había estudiado Medicina y la abandonó bien pronto, para dedicarse también a las Ciencias Exactas, se incorporó a la misma Universidad de Breslau como profesor de Matemática y Físico-Matemática.

Luego de un breve paso por la Academia de Bosques de Neustadt-Eberswalde (1866/67), donde tuvo una extremadamente elevada carga docente que le dejaba escaso tiempo para sus trabajos de investigación, en 1868 fue convocado como Profesor Ordinario y Director del Laboratorio Químico del Politécnico de Karlsruhe. Un tiempo antes de su traslado a la Academia de Bosques se había casado con Johanna Volkmann, matrimonio del cual nacieron, entre 1867 y 1874, cuatro hijos, dos varones y dos mujeres.

Lothar Meyer trabajó en Karlsruhe entre 1868 y 1876. Durante la guerra franco/prusiana (1870/1871) parte del Politécnico fue utilizada como lazareto, y Meyer se ocupó de la dirección del mismo, volviendo a utilizar sus conocimientos y habilidades médicas. Incluso, al finalizar esa guerra le fue concedida una medalla en reconocimiento a esa labor.

En 1876 fue convocado como Profesor de Química Teórica, por la Universidad de Tübingen, para suceder a Rudolph Fittig (1835-1910) y a partir de ese momento se estableció definitivamente con su familia en esa bella ciudad universitaria. Allí dictaba regularmente los cursos de Química Inorgánica y de Química Orgánica y también cursos especiales sobre diferentes aspectos de la fisicoquímica. Por otra parte, bien pronto el nombre de Lothar Meyer comenzó a atraer hacia Tübingen, y en forma continuada, a numerosos grupos de estudiantes no sólo de Alemania sino también de otras partes del mundo.

También a partir de esos años comenzó a recibir numerosos reconocimientos y distinciones. En 1882 recibió, conjuntamente con Mendeleev, por sus trabajos sobre la clasificación periódica de los elementos la Medalla Davy de la Royal Society de Londres y al año siguiente fue designado Miembro Honorario de la Chemical Society. En 1888 fue nombrado miembro correspondiente de la Academia Prusiana de Ciencias y en 1891 de la Academia de Ciencias de San Petersburgo. En 1892 recibió la Cruz de Honor del Orden de la Corona de Würtenberg, lo que le permitió llamarse a partir de entonces, von Meyer. En el período 1894/1895 fue designado Rector de la Universidad de Tübingen y, el 11 de abril de 1895, poco tiempo después de finalizar con su mandato, falleció a la edad de 64 años siendo sepultado en el cementerio Estatal de Tübingen.

3. Obra científica

Lothar Meyer ha dejado huellas importantes en varios de los campos de la Química, sin embargo aquí nos restringiremos fundamentalmente a su labor en relación al ordenamiento periódico de los elementos. Con el continuo descubrimiento de nuevos elementos a lo largo del s. XIX y con la posibilidad de la determinación cada vez más precisa de los pesos atómicas de los mismos, aumentaron en el ámbito científico los esfuerzos para desarrollar una clasificación de los elementos y en la búsqueda de encontrar algún tipo de relaciones cuantitativas entre ellos, basadas en sus pesos atómicos.

Un antecedente y motivador fundamental en este desarrollo fue sin duda el Primer Congreso Internacional de Química, desarrollado en Karlsruhe entre el 3 y el 5 de setiembre de 1860 y hay consenso general entre los historiadores de la Ciencia que este Congreso llevó a la constitución definitiva de la Química como Ciencia moderna (deMilt 1951; Cid Manzano 2009). A mediados del s. XIX había una gran confusión entre peso atómico, peso molecular y peso equivalente y asimismo sobre la nomenclatura y manera de formular los compuestos químicos. Aparecía pues necesario poner algún tipo de orden y acuerdo en todo este estado de confusión y fue August Kekulé (1829-1896) el que sugirió organizar un Congreso Internacional que permitiera convocar a los más importantes químicos de la época para empezar a clarificar todas estas cuestiones. Incluso se ha llegado a decir que esta fue una de las contribuciones más importantes de Kekulé el desarrollo de la Química (deMilt 1951).

Para encaminar este proyecto Kekulé contó con la inestimable ayuda del notable químico francés Adolphe Wurtz (1817-1884) y de Karl Weltzien (1813-1870), quien a la sazón era profesor de Química en la Escuela Superior Técnica de Karlsruhe. Tanto Lothar Meyer como Dimitri Mendeleev asistieron a este Congreso, el que tuvo un fuerte impacto en todos sus trabajos y desarrollos científicos posteriores. Una de las figuras centrales y más importantes del Congreso fue, indudablemente, Stanislao Cannizzaro (1826-1910). Este químico italiano fue un ferviente defensor de la hipótesis de Avogradro, que había sido publicada en 1811 en el "Journal de Physique" pero había tenido escaso impacto hasta ese momento en la comunidad científica (deMilt 1951; Fluck y Rumpf 1986; Cid Manzano 2009). Según esta hipótesis, volúmenes iguales de gases diferentes, a la misma presión y temperatura, deberían contener el mismo número de moléculas. Y a partir de esa hipótesis se encontró una nueva llave para la determinación de pesos atómicos, lo que indudablemente fue un gran soporte para los intentos inmediatamente posteriores de ordenamiento de los elementos. Y, además, paulatinamente, esa hipótesis pasó a transformarse en una de las Leyes fundamentales de la Química moderna. Cannizzaro también defendió con mucha claridad otras ideas relacionadas con el tema de átomos y moléculas y con los pesos atómicos.

En todos los debates, tanto en plenarios como en comisiones, hubo discusiones relevantes sobre los más variados aspectos que interesaban, y muchas veces dividían, a la comunidad química de ese entonces. No obstante, hubo acuerdos en varios puntos importantes, p. ej., se adoptaron nuevos pesos

atómicos para átomos fundamentales (H, O, C), se introdujeron numerosas mejoras no solo en la nomenclatura sino también en la representación de los compuestos químicos, se reconoció que ciertos elementos como el hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y cloro estaban constituidos por moléculas diatómicas y no por átomos individuales. Tanto Meyer como Mendeleev parecen haber quedado fuertemente impactados por los resultados y los debates de este Congreso y de hecho, es evidente que a partir de ellos tomaron una más clara y firme conciencia de la importancia de los pesos atómicos.

Ya Johann Wolfgang Döbereiner (1780–1849), profesor de Química en la Universidad de Jena, había logrado establecer algunas relaciones numéricas sencillas entre los pesos atómicos de algunos elementos químicamente análogos (las llamadas "tríadas de Döbereiner" (1829), por ejemplo el Br₂ muestra un peso atómico que es aproximadamente la media aritmética de los pesos de sus congéneres Cl₂ y I₂) (Weeks 1932; Baran 2019; Boeck 2019). Este trabajo, conocido por Meyer, lo indujo a avanzar en esa misma línea de pensamiento y tratar de hallar nuevas relaciones entre los pesos atómicos de elementos químicos análogos (Boeck 2019). Ya en su tratado "Las Modernas Teorías de la Química" publicado en 1864, Meyer incluyó por primera vez lo que podría ser un ordenamiento periódico de los elementos, que abarcaba 28 elementos (Li, Be, C, N, O y F, y sus análogos más pesados) aunque no utiliza en ningún momento el término de periodicidad. En realidad él estaba más interesado en las relaciones numéricas que podían establecerse entre los pesos atómicos de los elementos. Así encontró que entre los dos primeros pares de elementos de su Tabla la diferencia de masa era siempre del orden de 16 y para los pares posteriores oscilaba en torno a 46 (Boeck 2019). Más adelante extendió ese ordenamiento a 50 elementos, incluyendo a los metales de transición. Posteriormente, en 1868 cuando estaba trabajando en la segunda edición de su Tratado incluyó también a los elementos Al y Cr, llegando a ordenar entonces 52 elementos. Esta Tabla así conformada fue la que finalmente publicó también en un artículo separado en los Annalen der Chemie con el título "La naturaleza de los elementos químicos como función de su peso atómico" en el año 1870 (Meyer 1870), es decir un año después del trabajo fundamental de Mendeleev, publicado en el Journal de la Sociedad de Química de Rusia. Esta Tabla, publicada por Meyer es la que se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Tabla de los elementos químicos de Lothar Meyer (adaptada de Meyer, 1870).

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.
	B=11.0	Al=27.3				In=113.4	Tl=202.7	
	C=11.97	Si=28				Sn=117.8		Pb=206.4
			Ti=48		Zr=89.7			
	N=14.01	P=30.9		As=74.9		Sb=122.1		Bi=207.5
			V=51.2		Nb=93.7		Ta=182.2	
	0=15.96	S=31.98		Se=78		Te=128?		
			Cr=52.4		Mo=95.6		W=183.5	
	F=19.1	Cl=35.38		Br=79.75		I=126.5		
			Mn=54.8		Ru=103.5		Os=198.6?	
			Fe=55.9		Rh=104.1		Ir=196.7	
			Co=58.6		Pd=106.2		Pt=196.7	
			Ni=58.6					
Li=7.01	Na=22.99	K=39.04		Rb=85.2		Cs=132.7		
			Cu=63.3		Ag=107.6		Au=196.2	
Be=9.3	Mg=23.9	Ca=39.9		Sr=87.0		Ba=136.8		
			Zn=64.9		Cd=111.6		Hg=199.8	

Como puede verse, en las columnas los elementos quedan agrupados por sus pesos atómicos crecientes, mientras que en las filas se encuentran los elementos químicamente análogos.

Sin lugar a dudas, con esta Tabla Meyer avanzó en la misma percepción que Mendeleev. Sin embargo, y como ya se mencionara, antes de 1870 siempre habló solo de las relaciones que podían establecerse entre los pesos atómicos y nunca mencionó la idea de relaciones periódicas. Enfatizó reiteradamente que la diferencia de masas atómicas entre los pares de elementos ubicados en las primeras dos columnas era del orden de 16 y en las columnas subsiguientes estaba en el orden de los 46, para pasar a estar entre 88-92 entre los elementos más pesados (Meyer 1870; Boeck 2019). Para Meyer, estas diferencias aproximadamente constantes entre elementos estaban relacionadas directamente con la naturaleza compleja de los átomos (Boeck 2019). Por otra parte, y recién en este trabajo de Annalen, Meyer expresa por primera vez la idea de que las propiedades de los elementos son en gran parte funciones periódicas de sus pesos atómicos (Meyer 1870).

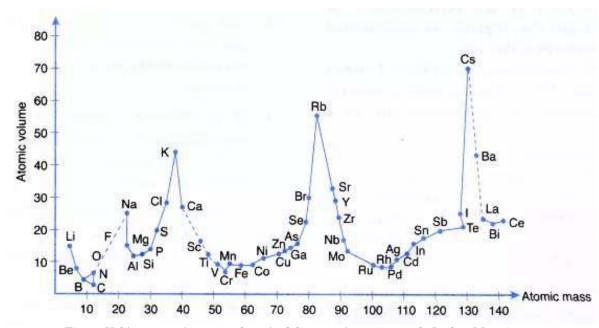


Fig. 2. Volúmenes atómicos en función del peso atómico (curva de Lothar Meyer).

En otra sección de la publicación Meyer dice claramente que una de las propiedades que varían regularmente con el peso atómico son los volúmenes atómicos y propone una representación en la que en el eje de abscisas se ubican los pesos atómicos de los elementos y en el de las ordenadas sus volúmenes atómicos (es decir el cociente entre su peso atómico y su densidad). Este gráfico se presenta en la Fig. 2.

Como puede verse del desarrollo de esa curva, los volúmenes atómicos y las propiedades químicas relacionadas son también una función periódica de la magnitud de su peso atómico (Meyer 1870; Boeck 2019). A medida que aumentan los pesos atómicos los volúmenes crecen y decrecen regularmente y la curva presenta cinco máximos. Además, si se contemplan posiciones equivalentes en cualquier lugar de la curva, se encontrarán elementos con propiedades análogas. El hecho de que los máximos de la curva correspondan a elementos relativamente livianos y los tres últimos mínimos, a metales pesados concuerda con el conocido hecho de que los primeros tienen volúmenes atómicos relativamente grandes y los otros muy pequeños (Meyer 1870). Por otra parte, los elementos más volátiles y fácilmente fusibles se encuentran siempre en las porciones ascendentes de las curvas mientras que los más refractarios se ubican en la parte descendente o en los mínimos (Meyer 1870). Asimismo, Meyer remarcó que también la fusibilidad, la maleabilidad y el comportamiento electroquímico de los elementos son también propiedades periódicas (Meyer 1870).

Así como la Tabla de Mendeleev, también la de Meyer muestra algunos huecos, que corresponden a elementos que todavía no habían sido descubiertos. Sin embargo a diferencia de Mendeleev quien hizo algunas predicciones muy acertadas y precisas acerca de las propiedades y características de los elementos faltantes, Meyer solo comenta que seguramente esos elementos en algún momento serán descubiertos e incluidos en el ordenamiento. Tres de esos elementos fueron descubiertos unos años después. El galio (eka-aluminio, en la terminología de Mendeleev) en 1875 por Paul E. Lecoq de Boisbaudran (1838-1912), el escandio (eka-boro) en 1879 por Lars F. Nilson (1840-1899) y el germanio (eka-silicio) en 1886, por Clemens Winkler (1839-1904). Obviamente, estos descubrimientos y las acertadas predicciones previas sobre ellos acrecentaron enormemente la fama y el reconocimiento público de Mendeleev y su descubrimiento.

Asimismo, y durante un cierto tiempo hubo entre Meyer y Mendeleev una serie de discusiones y controversias públicas acerca de la prioridad en el descubrimiento del ordenamiento periódico de los elementos (Boeck y Zott 2007; Boeck 2019) la que, aparentemente, llegó a su fin cuando ambos recibieron la ya comentada medalla Davy de la Royal Society.

De todas formas, este breve análisis muestra claramente que Meyer inició sus estudios en búsqueda de un ordenamiento sistemático de los elementos, tratando de extender las ideas de Döbereiner, buscando relaciones numéricas que permitieran explicar o predecir algún tipo de comportamiento. Aparentemente, Mendeleev tuvo más claro desde el mismo comienzo de sus análisis la idea que de alguna manera, simplemente es el peso atómico del elemento el que determina sus propiedades características y al ordenar a los elementos (al igual que Meyer) en base a sus pesos atómicos crecientes se le hizo evidente la existencia de la periodicidad en las propiedades de los elementos químicos. Esta noción parecería haber cuajado mucho más lentamente en el caso de Meyer. Sin embargo, el resultado último de ambos enfoques condujo, finalmente, al mismo tipo de ordenamiento.

A muchos científicos de la época se les hizo evidente que detrás de ese ordenamiento periódico debía haber algo más, o algunas razones más poderosas para justificarlo. El mismo Mendeleev notó que "la diferencia interna en la materia que constituye los átomos" podría ser la responsable de la recurrencia periódica de sus propiedades. Si bien en ese momento todavía no se tenía una idea de cómo era el ordenamiento interno de la estructura atómica, se hizo bien pronto evidente que las propiedades periódicas debían ser la consecuencia de algún tipo de ordenamiento interno de los átomos. En 1907, año de la muerte de Mendeleev, ya se sabía que el átomo estaba compuesto de electrones que transportaban carga negativa, así como algún tipo de componente cargado positivamente para lograr la neutralidad eléctrica. Y cuatro años después, en 1911, Ernest Rutherford (1871-1937) descubrió el núcleo atómico. Y sólo dos años más tarde Henry Moseley (1887-1915), analizando la radiación X característica emitida por los distintos elementos pudo demostrar que es el número de protones de un átomo (o sea su número atómico) el que determina el orden correcto de los elementos en la

Tabla Periódica. O sea, finalmente, podemos decir que la ubicación de los elementos en la Tabla es una función periódica de su número atómico (Boeck y Zott 2007).

Referencias

- Baran EJ (2019) 2019-Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos. Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 71:11-14.
- Boeck G (2019) Das Periodensystem der Elemente und Lothar Meyer. Chemie in unserer Zeit, 53:372-382.
- Boeck G, Zott R (2007) Dmitrij Ivanovic Mendeleev (1834-1907): Zum 100. Todestag. Chemie in unserer Zeit, 41:12-20.
- Cid Manzano R (2009) El Congreso de Karlsruhe: paso definitivo hacia la química moderna. Revista Eureka de Enseñanza y Divulgación Científica, 6:396-407.
- deMilt C (1951) The Congress at Karlsruhe. Journal of Chemical Education, 28: 421-425.
- Fluck E, Rumpf K (1986) Alte und neue Diskussionen über das Periodensystem der Elemente. Chemie in unserer Zeit, 20:111-116.
- Meyer L (1870) Die Natur der chemischen Elemente als Funktion ihrer Atomgewichte. Annalen der Chemie. VII. Supplementband, 354-364.
- Weeks ME (1932) The discovery of the elements. XIV. The periodic system of the elements. Journal of Chemical Education, 9:1593-1604.



Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Argentina Tomo 72, 2021

AMÉRICA DEL SUR Y ÁFRICA EN LA FORMACIÓN DEL GONDWANA OCCIDENTAL*

Miguel Angelo Stipp Basei

Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Brasil. E-mail: baseimas@usp.br

* Resumen extendido. Trabajo presentado por M. A. S. Basei en oportunidad de su incorporación como Académico Correspondiente de la ANCEFN (25 de septiembre de 2020)

Con el fin de contribuir a la elaboración de un modelo tectónico robusto que aborde la formación del Gondwana Occidental, se discutirán los datos existentes que caracterizan la evolución tectónica del Cinturón Dom Feliciano y su correlación con equivalentes africanos. Estará basada en una revisión del conocimiento geocronológico disponible para la parte sudeste de Brasil y Uruguay con la adicción de nuevos datos radimétricos U-Pb de rocas volcánicas sedimentarias básicas y edades en circones detríticos de las sucesiones metasedimentarias.

En el basamento de la Plataforma Sudamericana se pueden identificar dos amplios dominios geotectónicos: el dominio amazónico o pre-brasiliano de afinidades laurénticas y el dominio brasiliano de afinidades gondwánicas. Desde el Toniano en adelante, los regímenes convergentes de placas oceánicas estuvieron activos en el dominio occidental, mientras que los regímenes divergentes segmentaban los bloques continentales del Congo - San Francisco y Kalahari - Río de la Plata (Affaton et al. 2016; Frimmel et al. 2011; Basei et al. 2018) resultando en la apertura del océano Adamastor.

La instalación de arcos magmáticos en márgenes continentales activos ocurrió al final de los procesos de expansión oceánica en el dominio del Cinturón Dom Feliciano, marcando el inicio de un período de convergencia entre los grandes cratones. Esta dinámica litosférica fue rápida y culminó en colisiones en el Ediacáriano que fueron seguidas por regímenes de extensión litosférica con magmatismo subalcalino. En este contexto, la articulación entre las masas crratónicas y los antiguos bloques continentales cuando se cerró el océano Adamastor permitió la generación de fajas plegadas neoproterozoicas (Ribeira, Araçuaí, Dom Feliciano, Oeste do Gongo, Kaoko, Damara, Gariep y Saldanha) en ambos lados del océano Atlántico Sur (Frimmel et al. 2011; Basei et al. 2018; Peixoto et al. 2015; Tedeschi et al. 2016; Philipp et al. 2016; Hueck et al. 2019).

Desde su límite norte en Santa Catarina hasta su final en Uruguay (Fig. 1), el Cinturón Dom Feliciano incluye tres segmentos corticales, con distintas características litológicas y tectónicas: Un Cinturón Granitoide (rocas sincolisionales calcoalcalinas que evolucionaron a granitoides alcalinas

tardías), una faja volcánico-sedimentaria metamórfica (esquistos verdes a anfibolita), y cuencas de antepaís (rocas sedimentarias anquimetamórficas). Esta estructura orogénica se logró solo en el período Ediacariano cuando estos diferentes segmentos fueron yuxtapuestos. Los contactos NE-SO entre los dominios y la vergencia tectónica hacia el oeste dominan en todo el cinturón orogénico. Esta geometría refleja diferentes pulsos tectónicos entre 640 y 580 Ma (Basei et al. 2011). En toda su extensión, la zona de sutura mayor Gercino - Sierra Ballena (ZSMGSB), separa las sucesiones supracorticales Brusque, Porongos y Lavalleja de los cinturones graníticos constituidos por los batolitos Florianópolis, Pelotas y Aiguá. Estudios recientes (Oriolo et al., 2016, Passarelli et al. 2011, Hueck et al. 2018) han permitido situar la fase colisional de este lineamiento en 610 ± 10 Ma y una reactivación recurrente alrededor de 580 Ma.

Las sucesiones supracorticales del Cinturón Dom Feliciano comprenden los depósitos de margen pasivo en el lado occidental del océano Adamastor, mientras que las fajas del Congo Occidental, Kaoko y Gariep serían sus equivalentes en en el margen oriental. A pesar de ser discontinuas, debido a las cubiertas sedimentarias fanerozoicas, se sugiere la continuidad entre los diferentes segmentos del Cinturón Dom Feliciano considerando que se reconocen los mismos estadios evolutivos en todos los diferentes segmentos que contribuyen a este cinturón, destacando el metamorfismo de baja presión y características corticales del magmatismo granítico. En todo el cinturón, se observan ocurrencias de *inliers* gneissico-migmatíticos, con edades de alrededor de 2000-2200 Ma.

El registro más antiguo de magmatismo anorogénico (Basei et al. 2011) que precedió a la instalación de las cuencas sedimentarias del Cinturón Dom Feliciano, es Toniano con edades alrededor de 930 Ma (metagabro) y 845 Ma (sienogranito tipo A). Granitoides corticales, sincolisionales de ca. 610 ± 10 Ma, cortan las secuencias supracorticales regionales, desarrollando halos de metamorfismo de contacto. Estos granitoides son más frecuentes en la porción norte de la faja y menos abundantes en el sur, siendo escasos en las rocas del Grupo Lavalleja en Uruguay (Koester et al. 2001, Hueck et al., 2019).

En un contexto geotectónico amplio, se postula que en el Toniano, alrededor del 780 Ma, se inició el depósito en cuencas marginales de unidades siliciclásticas marinas, asociadas a restos ofiolíticos y volcánicos interestratificados. En el Criogeniano, hacia los 640 Ma, se desarrollaron cuencas volcánico-sedimentarias, con magmatismo bimodal y afinidades alcalinas relacionado con los principales depósitos volcánico-exhalativos conocidos en el cinturón, caracterizándose en Santa Catarina por poderosos depósitos de turmalina, rocas calcosilicáticas y metabásicas. El conjunto completo de rocas supracorticales se plegó y metamorfizó polifásicamente, siendo la foliación S₂ la principal superficie reconocida regionalmente en el

conjunto metasedimentario. Esta foliación estaría asociada con *nappes* sinmetamórficos con transporte al N-NW.

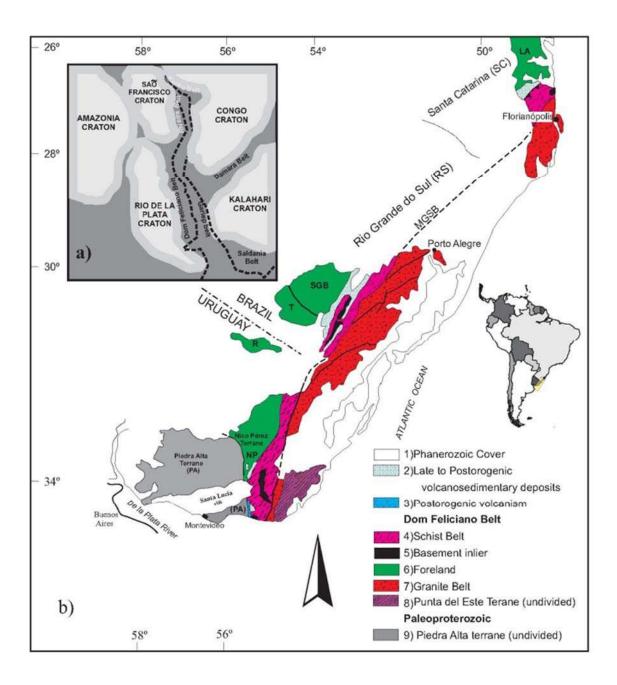


Fig. 1. Esquema tectónico del Cinturón Dom Feliciano (Brasil-Uruguay) con énfasis en el Cinturón Granítico (raíz del arco magmático)

En términos geodinámicos, se propone que la principal causa de los plegamientos y *nappes* observados a lo largo de del Cinturón Dom Feliciano sería la compresión relacionada con el acercamiento del arco magmático representado por los batolitos Florianópolis, Pelotas y Aiguá durante el proceso de cierre del océano Adamastor. Como resultado de la colisión, el conjunto volcánico-sedimentario se vio afectado por numerosos granitoides

aluminosos a peraluminosos. Asociado a la intrusión de estos cuerpos graníticos, habría ocurrido, alrededor de los 610 Ma, un segundo pico térmico responsable del clímax metamórfico, en facies de esquisto verde alta a anfibolita. Este metamorfismo y la generación de cuerpos graníticos sería debido al aumento de temperatura, debido a la yuxtaposición del arco magmático, cuando aún estaba caliente. Esto explicaría el sincronismo entre las edades de los cuerpos graníticos a ambos lados de la zona de sutura mayor Gercino-Sierra Ballena que separa las supracorticales (NW) del dominio del arco magmático (SE).

Si la mayor parte del registro sedimentario de circones detríticos y del magmatismo sinsedimentario indican depositación de las unidades supracorticales del Toniano al Criogeniano, la existencia de depósitos ediacarianos sinorogénicos, donde el arco se convierte en la principal fuente de entrada de detritos para estas unidades, está bien documentada en el Grupo Porongos (Rio Grande do Sul), por los depósitos del antiforme de Capané (Pertille et al. 2017; Höfig et al. 2018). Con la continuación de la compresión postcolisional en el Cinturón Dom Feliciano, cabalgamientos tardíos con transporte hacia el noroeste, colocaron las unidades metasedimentarias ya afectadas por cuerpos graníticos, sobre las rocas de las cuencas de antepaís (Itajaí - Camaquã- Arroyo do Soldado). Estos tramos, que se habrían producido a baja temperatura, en la transición frágil-dúctil representan el final de la deformación regional del Cinturón Dom Feliciano.

En términos regionales, esta evolución estaría relacionada con el proceso de convergencia de placas Criogeniano-Ediacariano, responsable de la generación de las fajas plegadas sudamericanas de Araçuaí, Ribeira y Dom Feliciano y de los cinturones Congo Occidental, Kaoko, Damara y Gariep en el sudoeste de África. Ambos conjuntos se debieron a la interacción entre los cratones de São Francisco-Congo, Paranapanema, Río de la Plata, Angola y Kalahari.

Por lo tanto, el océano Adamastor, que se originó en la fragmentación toniana de Rodinia, habría jugado un papel crucial en la formación del Gondwana Occidental. En este contexto, los actuales cinturones de rocas supracorticales observadas a ambos lados del Atlántico Sur representan los equivalentes metamórficos de sus antiguas cuencas marginales. El cinturón granítico que separa estas secuencias metasedimentarias sería el mejor testimonio de la existencia de una corteza oceánica neoproterozoica que, con su consumo, habría generado un arco magmático maduro en el margen de los cratones africanos.

Una vez terminados los eventos relacionados con el cierre de las diversas ramas del océano Adamastor en el margen oriental de los cratones del Río de la Plata y Paranapanema, esta región se estabilizó con los procesos orogénicos todavía relacionados con la formación de Gondwana Occidental siendo éstos

transferidos al borde occidental de los cratones, que tendría en las Sierras Pampenas, ya en el Cámbrico, uno de sus mejores ejemplos.

Referencias

- Affaton P, Kalsbeek F, Boudzoumou F, Trompette R, Thrane K, Frei R (2016) The Pan-African West Congo belt in the Republic of Congo (Congo Brazzaville): Stratigraphy of the Mayombe and West Congo Supergroups studied by detrital zircon geochronology. Precambrian Research, 272:185–202.
- Basei MAS, Frimmel HE, Nutman AP, Preciozzi F, Jacob J. (2005) A connection between the Neoproterozoic Dom Feliciano (Brazil/Uruguay) and Gariep (Namibia/South Africa) orogenic belts-evidence from a reconnaissance provenance study. Precambrian Research, 139:195–221.
- Basei MAS, Campos Neto MC, Castro NA, Nutman AP, Wemmer MT, Yamamoto MT, Hueck M, Osako L, Siga Jr. O, Passarelli CR (2011) Tectonic evolution of the Brusque Group, Dom Feliciano belt, Santa Catarina. Journal of South American Earth Sciences, 32:324–350.
- Frimmel HE, Basei MAS, Gaucher C (2011) Neoproterozoic geodynamic evolution of SW-Gondwana: a southern African perspective. International Journal of Earth Sciences, 100: 323–354.
- Höfig DF, Marques JC, Basei MAS, Giusti RO, Kohlrausch C, Frantz JC (2018) Detrital zircon geochronology (U-Pb LA-ICP-MS) of syn-orogenic basins in SW Gondwana: new insights into the Cryogenian-Ediacaran of Porongos Complex, Dom Feliciano Belt, southern Brazil. Precambrian Research, 306:189–208.
- Hueck M, Basei MAS, Wemmer K, Oriolo S, Heidelbach F, Siegesmund S (2018) Evolution of the Major Gercino Shear Zone in the Dom Feliciano Belt, South Brazil, and implications for the assembly of southwestern Gondwana. International Journal of Earth Sciences, 108:403–425.
- Hueck M, Basei MAS, Castro NA (2019) Tracking the sources and the evolution of the late Neoproterozoic granitic intrusions in the Brusque Group, Dom Feliciano Belt, South Brazil: LA-ICP-MS and SHRIMP geochronology coupled to Hf isotopic analysis. Precambrian Research, DOI: 10.1016/j.precamres.2019.105566.
- Koester E, Roisenberg A, Fernandes LAD, Soliani Jr. E, Nardi LVS, Kraemer G (2001) Petrologia dos granitóides sintectônicos à Zona de CisalhamentoTranscorrente Dorsal de Canguçu, Encruzilhada Do Sul, RS. Revista Brasileira de Geociências, 31:131-140.
- Oriolo S, Oyhantçabal P, Wemmer K, Heidelbach F, Pfänder J, Basei MAS, Hueck M, Hannich F, Sperner B, Siegesmund S (2016) Shear zone evolution and timing of deformation in the Neoproterozoic transgressional Dom Feliciano Belt, Uruguay. Journal of Structural Geology, 92:59–78.
- Passarelli CR, Mc Reath I, Basei MAS, Siga Jr. O, Campos Neto MC (2011) Heterogeneity in syntectonic granitoids emplaced in a major shear zone, southern Brazil. Journal of South American Earth Sciences, 32:369–378.
- Peixoto E, Pedrosa-Soares AC, Alkmim FF, Dussin IA (2015) A suture related accretionary wedge formed in the Neoproterozoic Araçuaí orogen (SE Brazil) during Western Gondwanaland assembly. Gondwana Research, 27:878–896.
- Philipp RP, Pimentel MM, Chemale Jr. F (2016) Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology. Revista Brasileira de Geociências, 46:83–104.
- Tack L, Wingate MTD, Liégeois J-P, Fernandez-Alonso M, Deblond A (2001) Early Neoproterozoic magmatism (1000–910 Ma) of the Zadinian and Mayumbian Groups (Bas-Congo): onset of Rodinia rifting at the western edge of the Congo craton. Precambrian Research, 110:277–306.
- Tedeschi M, Novo T, Pedrosa-Soares AC, Dussin IA, Tassinari CGT, Silva LC, Gonçalves L, Alkmim FF, Lana C, Figueiredo C, Dantas E, Medeiros S, Campos C, Corrales F, Heilbron M (2016)
 The Ediacaran Rio Doce Magmatic Arc revisited (Araçuaí-Ribeira orogenic system, SE Brazil).
 Journal of South American Earth Sciences, 68:167–186.



Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Argentina Tomo 72, 2021

LA MOVILIZACIÓN DE LOS ÓXIDOS DE HIERRO Y DE CROMO: UNA MEZCOLANZA DE QUÍMICA, BIOLOGÍA Y GEOLOGÍA*

Miguel A. Blesa

Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de San Martín. Email: miblesa 7@gmail.com

*Trabajo presentado por M. A. Blesa en oportunidad de su incorporación como Académico Titular de la ANCEFN (20 de octubre de 2020) (https://www.youtube.com/watch?v=dvIdBetebo0)

Palabras clave

Ciclo biogequímico del hierro Descontaminación de superficies metálicas Síntesis suave de materiales

Resumen Tanto el hierro como el cromo forman en medios acuosos iones en estado de oxidación 2+, 3+ y 6+; la oxidación del Cr(III) es más fácil y su reducción es más difícil en comparación con el hierro(III). La tendencia a la hidrólisis aumenta en ambos elementos al aumentar el estado de oxidación. Asociada a esta propiedad, la solubilidad de las correspondientes sales también varía apreciablemente: las sales de Fe²⁺ y Cr²⁺ son muy solubles, y también lo son los ferratos y cromatos; en cambio tanto Fe³⁺ como Cr³⁺ forman en agua precipitados insolubles, excepto en medios apreciablemente ácidos. Una forma adicional bien conocida de aumentar la solubilidad de las sales de hierro(III) -y de cualquier metal- es la complejación con ligandos adecuados. El hierro pertenece al grupo que tiene especial afinidad por los ligandos que tienen grupos carboxilato -los ácidos policarboxílicos en general y también los derivados del catecol. Estas simples consideraciones químicas fueron la base del desarrollo de procesos de descontaminación de superficies metálicas de instalaciones nucleares; también juegan un rol central en la bioquímica del hierro, y en su ciclo biogeoquímico. En el caso del cromo, estos conceptos definen su comportamiento como contaminante de aguas naturales. Estos aspectos muestran la fuerte interrelación de las ciencias químicas, biológicas y geológicas, así como su impacto en las ciencias ambientales.

Keywords

Iron biogeochemical cycle Decontamination of metal surfaces Soft synthesis of matierials Abstract The mobilizaton of iron and chromium oxides: a mixture of chemistry, biology, and geology. Both iron and chromium in aqueous media form ions in oxidation states 2+, 3+ and 6+; oxidation of Cr(III) is easier than that of Fe(III), whilst its reduction is more difficult. Hydrolysis becomes more important in both elements as the oxidation state increases. Linked to this property, solubility of the salts varies appreciable: Fe²⁺ and Cr²⁺ salts are very soluble, and the same is true for ferrate(VI) and chromate(VI). On the other hand, Fe³⁺ and Cr³⁺ form in water insoluble precipitates except in rather acidic media. An additional way to increase the solubility of the Fe(III) and Cr(III) slats is through complexation with adequate ligands. Iron belong to the group of metals exhibiting special affinity for ligands containing carboxylate groups -polycarboxylic acids, and also catechol derivatives. These simple ideas were the basis for the development of chemical decontamination processes of metal surface in nuclear facilities. They also play a key role in the behavior of iron in biological systems and in its global biogeochemical cycle. In the case of chromium, these concepts define its behavior as a contaminant in water bodies. A strong link is therefore established between chemistry, biology and geology, and also on environmental sciences.

1. Introducción

La Química, la Ciencia Central según algún libro de texto, sigue teniendo una centralidad muy notable, proveyendo herramientas para otras ciencias, con lo que aparece muy entremezclada con la Física, la Biología y la Geología. Esa mezcla aparece en especial en los ámbitos que son a mi modo de ver las verdaderas fronteras actuales del conocimiento, y también las fronteras de las nuevas tecnologías. Es así que la Química está fuertemente asociada con la Física en el desarrollo de nuevos materiales, en especial nanomateriales, está fuertemente asociada con la Geología en la comprensión del Ciclos Biogeoquímicos (y muchos otros temas), y, lógicamente, está fuertemente asociada con la Biología en todas las ramas de la Biología Molecular.

¿Hay algo interesante en el hierro, elemento que el hombre ha venido manipulando desde hace 3.200 años o más? Comenzaré mostrando cómo las más elementales de las propiedades químicas del hierro en medios acuosos juegan un papel importante en el comportamiento global del planeta y en la propia química de la vida. Después describiré un proyecto tecnológico que ilustra los mismos aspectos de la química del hierro. La mayoría de la información relevada es bastante antigua, pero su tratamiento conjunto demuestra la ubicuidad —en el ambiente, en la b i o l o g í a y en l a t e c n o l o g í a - d e

los mecanismos de óxido-reducción, ácido-base, de complejación y de disolución-precipitación de los compuestos de hierro. Trataré de mostrar que el delicado balance de estos procesos está presente mucho más de lo que parece a simple vista en el funcionamiento del planeta y de la vida. Y, por supuesto, en la tecnología.

2. La visión de los químicos inorgánicos del comportamiento del hierro en agua

Se suele resumir el comportamiento del hierro en agua con el correspondiente diagrama de Pourbaix, o diagrama E_H/pH. Estos diagramas muestran las zonas de prevalencia (campos de estabilidad) de las distintas especies químicas en el plano definido por el pH y por potencial redox de la solución (Fig. 1).

Interesa especialmente el campo de estabilidad del óxido férrico sólido. Se ve en la Fig. 1 que su solubilidad es una fuerte función del pH y del potencial redox. Excepto en soluciones muy ácidas o en potenciales muy altos, predominan los óxidos sólidos: la solubilidad es muy baja. Las flechas señalan las formas de desestabilizar termodinámicamente a los óxidos: la disolución oxidativa (flecha negra), la disolución ácida (flecha azul) y la disolución reductiva (flecha roja).

Una forma adicional bien conocida de aumentar la solubilidad de las sales de hierro(III) —y de cualquier metal- es la complejación con ligandos adecuados. El hierro pertenece al grupo que tiene especial afinidad por los ligandos que tienen grupos carboxilato —los ácidos policarboxílicos en general y también los derivados del catecol. Los geólogos y químicos que estudian aguas naturales están bien familiarizados con los diagramas de Pourbaix modificados por la presencia de complejantes.

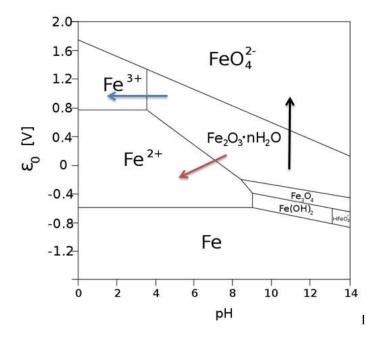


Fig. 1. Diagrama de Pourbaix para el hierro, con [Fe] = 1 M. De: Western Oregon University (https://people.wou.edu/~courtna/ch412/pourbaix.htm)

Muestro un ejemplo de cómo se distribuye las distintas especies de hierro(III) disuelto en presencia de un ácido dicarbóxilico, en este caso el ácido propiliminodiacético, en función del pH (Fig. 2). Puede apreciarse que por encima de pH 3 la fracción del hierro disuelto como Fe³⁺ es muy pequeña.

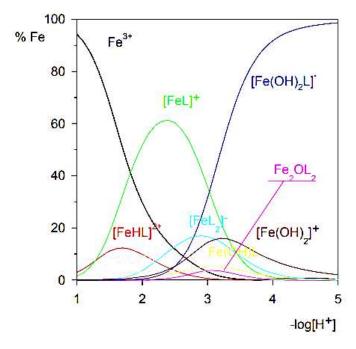


Fig. 2. Especiación de Fe(III) en soluciones equimolares de PIDA y Fe(III), $2x10^{-3}$ M. De: Sánchez Suárez (1996).

Toda esta descripción es una descripción termodinámica, que describe los procesos factibles, pero no entra en el tema de la velocidad del proceso de disolución (o a la inversa, de precipitación). Los químicos saben muy bien que el hierro(II) es mucho más lábil que el hierro(III): puede romper las uniones químicas con los átomos que lo rodean mucho más rápidamente, y así formar nuevas uniones. Es fácil disolver un óxido ferroso, pero mucho más trabajoso es disolver un óxido férrico, especialmente si es bien cristalino. Podemos colocar a ese óxido en condiciones en las que debería disolverse, pero la velocidad del proceso sería tan baja que no ocurriría nada.

Todo esto, de libro de texto elemental, tiene fuertes implicancias en Bioquímica, en Geoquímica y en Tecnología Nuclear, como veremos a continuación.

3. El ciclo global del hierro: eppur si muove

Pocos elementos químicos son más conocidos que el hierro. El hombre los sintetizó en estado elemental y a partir de allí fabricó todas las aleaciones que son en buena medida la base de muchas de sus ingenios.

En la naturaleza el hierro está presente esencialmente como sulfuros y como óxidos -la hematita, α-Fe₂O₃ que tiene el hierro en estado de oxidación 3+, y la magnetita, Fe₃O₄ que tiene el hierro en dos estados de oxidación, 3+ y 2+. El hierro elemental –metálico- es una rareza, fruto de meteoritos como el del Campo del Cielo, o como producto de la laboriosidad humana. Algunas de las primeras armas hechas de hierro emplearon hierro meteórico, mucho antes de lo que hemos dado en llamar la Edad de Hierro, allá en los finales de la prehistoria. En este trabajo hablaremos esencialmente de los óxidos de hierro y de las transformaciones que sufre en soluciones acuosas. Como todo elemento químico, el hierro no se crea ni se destruye, pero cambia de forma y se mueve en el ambiente en un ciclo cerrado, el ciclo biogeoquímico del hierro. La Fig. 3 muestra el ciclo global del hierro.

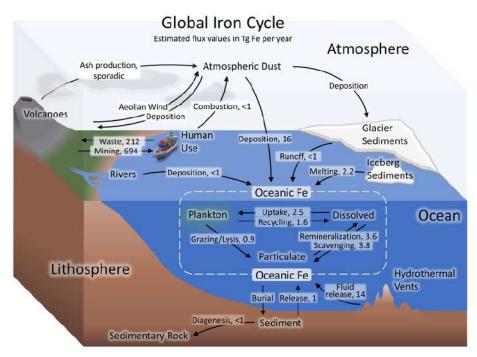


Fig. 3. Ciclo biogeoquímico global del hierro. De: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Iron_cycle7.png.

Si centramos la mirada en el agua del mar abierto, vemos que la fuente principal de hierro, del orden de 20 Tg por año (1 Tg = 10^{12} g) es el depósito de polvos atmosféricos con óxidos de hierro(III). También hay un aporte importante de sales ferrosas disueltas que llegan desde los venteos hidrotermales. El rectángulo en el mar describe la actividad biológica. Allí es central el proceso de disolución de los óxidos de hierro(III), proceso en el cual intervienen sustancias biológicas complejantes, que son capaces de atrapar los bajísimos niveles de hierro(III) disueltos en equilibrio con los óxidos. Estas sustancias son los sideróforos, descritos más adelante. También los procesos de reducción a hierro(II) favorecen la disolución; estos procesos de disolución reductiva son especialmente importantes. Finalmente, la reprecipitación y entierro provee el camino de eliminación del hierro que llega desde la atmósfera. El sumidero principal es la incorporación de hierro a los sedimentos.

En el mar abierto, las concentraciones de hierro disuelto en el agua son minúsculas. En la actualidad, los valores son inferiores a 1 nanomol por kg en aguas profundas, y tan bajo como 0,07 nanomoles por kg en superficie. Se visualiza pues un ciclo en superficie: la actividad biológica captura el escaso hierro disponible, lo usa, y sus detritos después lo transportan hacia aguas profundas. El tiempo de residencia del hierro disuelto en el mar es del orden de 100 años.

La productividad primaria de los organismos fotosintéticos en los océanos está limitada por la biodisponibilidad de hierro, y eso a su vez limita la capacidad del océano de absorción de dióxido de carbono atmosférico, proceso que podría ser el principal sumidero del exceso de CO₂ atmosférico de origen antrópico.

El oxígeno atmosférico, originado por la fotosíntesis es el que determina que el hierro accesible en la llamada zona crítica sea hierro(III), en forma de sólidos muy poco solubles.

La Fig. 3 es una foto de la situación actual, pero no siempre la situación fue así. La Fig. 4 muestra el árbol de la vida, la forma en la cual las especies fueron apareciendo, aumentando gradualmente la complejidad de la urdimbre de seres vivos.

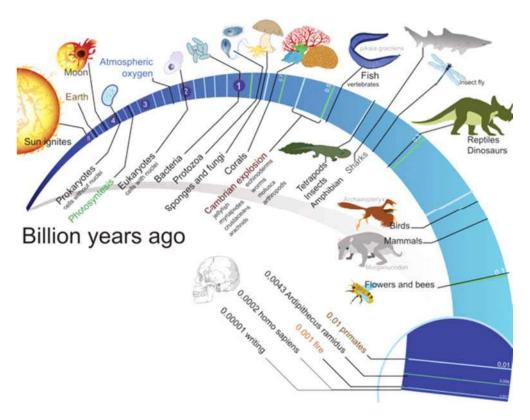


Fig. 4. El árbol de la vida. El oxígeno atmosférico apareció hace unos 2400 millones de años. De NASA (https://trs.jpl.nasa.gov/bitstream/handle/2014/49495/CL%2318-1948.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Allí está marcada la aparición de oxígeno. Hace unos 2.400 millones de años tuvo lugar la Gran Oxidación —la liberación de oxígeno fotosintético a la atmósfera. La Fig. 5 muestra la evolución de los niveles de oxígeno en la atmósfera.

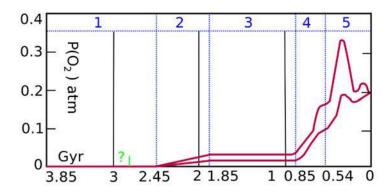


Fig. 5. Evolución de los niveles de oxígeno en la atmósfera. De: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Evolution_Of_Atmosferic_Oxygen.svg, con datos originales de Holland (2006)

La formación temprana de oxígeno fotosintético no se tradujo en un incremento inmediato de los niveles atmosféricos: había, especialmente en el agua de mar y en los sedimentos muchas sustancias químicas capaces de reaccionar con el oxígeno que estaban generado las bacterias, entre ellas las sales ferrosas. De allí la etapa 3, que duró casi 1000 millones de años y durante la cual los niveles de oxígeno en la atmósfera fueron muy bajos. Recién cuando prácticamente todas las sustancias capaces de reaccionar con el oxígeno, entre ellas el hierro disponible había sido oxidado —y precipitado-se comenzó a acumular el oxígeno en la atmósfera —es la etapa 4.

En la actualidad, los organismos biológicos poseen sofisticados sistemas para proteger a sus sistemas de la toxicidad que tiene el oxígeno. Lo interesante es que durante la transición, las sales ferrosas debieron jugar un papel importante en la destrucción el oxígeno y protegían así a las bacterias. Decía Preston Cloud (1968):

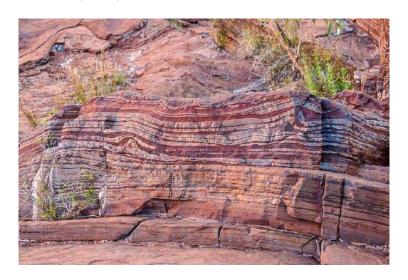


Fig. 6. Banded iron formation en el Karijini National Park (Australia). De: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Banded iron formation Dales Gorge.jpg.

Nevertheless, oxygen-releasing photosynthesizers did arise, and when they did they would have faced the problem of disposing of oxygen in such a way as not to burn themselves up. Unless advanced oxygen- and peroxidemediating enzymes, therefore, arose simultaneously with, or preceded, the origin of oxygen-releasing green-plant photosynthesizers, such organisms would probably have been dependent on an associated oxygen acceptor in the physical environment. The abundance of hematitic banded iron formation (BIF in Fig. 1) among sediments deposited between about 3 and 1.8 to 2 aeons ago suggests that the available oxygen acceptor may have been the ferrous ion.

Las *banded iron formations* (ver Fig. 6) son formaciones de bandas alternadas de rocas sedimentarias, con capas ricas en hierro y capas con poco hierro que proveen un excelente ejemplo del juego de reacciones redox y de precipitación/disolución que moldean el ciclo global del hierro.

Más adelante hablaremos un poco de la formación de diversos óxidos de hierro desde soluciones acuosas por procedimientos controlados. En el caso de las BIFs nos encontramos con la formación de magnetita (Fe₃O₄), un óxido que incorpora iones ferroso y férrico en su estructura de espinela. La Fig. 7 (Johnson et al., 2008) muestra los procesos que dan origen a la magnetita (y también a la siderita, carbonato ferroso). La herramienta esencial para proponer este esquema es la medición de las abundancias isotópicas de ⁵⁶Fe.

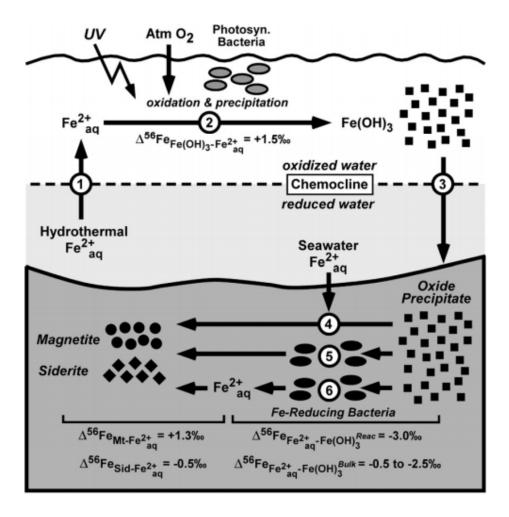


Fig. 7. Procesos involucrados en la formación de la magnetita y la siderita que dan origen a las BIFs. De: Johnson et al. (2008).

4. El papel del hierro en sistemas biológicos

El hierro es un nutriente esencial para todas las bacterias presentes en el agua de mar. Antes de la gran oxidación, había amplia disponibilidad de sales ferrosas, que por lo tanto no limitaban el crecimiento bacteriano. No es esa la situación actual. Los bajísimos niveles de hierro disuelto obligan a las bacterias autótrofas y heterótrofas a buscarlo mediante dos mecanismos: desarrollan procesos para disolver los óxidos de hierro(III), reduciéndolo a hierro(II) soluble, o recurren a sideróforos, que son normalmente péptidos, capaces de complejar al hierro(III) con afinidades extremadamente altas. Por ejemplo, el agente secuestrante típico de metales usado por el hombre es el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA); por eso hasta se lo llamó secuestrane. La constante de estabilidad del anión tetranegativo del EDTA por el Fe(III) es del orden de 10^{24} . Eso significa que una solución que contenga por litro 1 micromol de Fe³⁺ y 1 micromol de EDTA⁴⁻, dejaría solo 10^{-15} M de Fe³⁺ libre. El pH afecta crucialmente tanto el estado de protonación del EDTA como la hidrólisis del hierro(III), pero aun así la afinidad se mantiene elevada en un

amplio intervalo de pH, como se mostró en la Fig. 2. Las constantes de estabilidad de algunos sideróforos pueden llegar a superar el valor de 10^{50} , y sus contante de afinidad aparentes en las condiciones del agua de mar o de los fluidos corporales son del orden de 10^{11} o de 10^{13} , valores más que adecuados para poder secuestrar el hierro(III) de las partículas de óxidos suspendidas. La fracción de hierro no complejado es en esas condiciones entre 1% y 0.01% del total del hierro disuelto.

En los fluidos biológicos, como en el agua de mar, los niveles de hierro libre disuelto son extremadamente bajos. Esquemáticamente, el hierro se mueve en el organismo humano como se muestra en la Fig. 8.

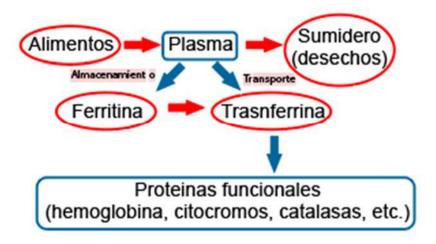


Fig. 8. La ruta del hierro en los seres humanos.

El juego Fe(II)/Fe(III) es importante en todas las flechas, como lo es también en la funcionalidad de hemoglobina, citocromo. Más adelante haremos una breve mención de algunas proteínas funcionales, pero este artículo está más centrado en el papel que juega la química redox, de complejación y de precipitación /disolución en el transporte y almacenamiento del hierro.

El almacenamiento de hierro se hace en la ferritina, compuesta por una proteína (la apoferritina, Fig. 9) que recubre un núcleo de ferrihidrita o de un fosfato básico de hierro, altamente insoluble. Aquí también se juega con la cupla Fe(III)/Fe(II): la apoferritina toma Fe(II) del fluido, y lo almacena como ferrhidrita, que es un óxido férrico hidratado poco cristalino. La liberación sigue el camino inverso.

La biosíntesis de heme se realiza insertando Fe(II) en el centro del macrociclo característico de este grupo. Para ello la enzima ferroquelatasa toma Fe(II) y lo inserta en los anillos distorsionados del heme. Necesita pues

disponer de Fe(II), cuyo origen último es la reducción de Fe(III) (Leeper, 1985).

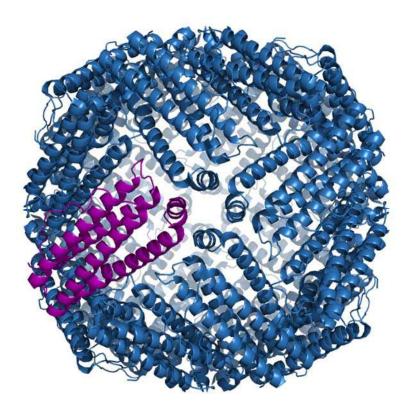


Fig. 9. Apoferritina de ratón (rMoLF). De Granier et al. (2003), reproducido de https://en.wikipedia.org/wiki/Ferritin#/media/File:Ferritin.png.

Las estrategias de las plantas para tomar hierro del suelo desde sus óxidos insolubles de estado de oxidación 3+ son similares: usan sideróforos, que permiten el pasaje a través de la membrana de la raíz de Fe(III) complejado (es el caso de maíz, avena y cebada), o reduce el Fe(III) a Fe(II) en el exterior de la raíz. usando reductores orgánicos fuertes y con intervención de la enzima Fe(III)-reductasa, presente en la membrana de la raíz; en este caso es el Fe(II) el que atraviesa la membrana de la raíz (como en la arveja y el tomate) (Connolly y Guinot 1998).

5. La cupla Fe(III)/Fe(II), la respiración y las especies reactivas de oxígeno (ROS)

La cadena de eventos de reducción del oxígeno durante la respiración, por agregado secuencial de un electrón y un protón (e-, H+) es la siguiente:

$$O_2 \longrightarrow HO_2^{\bullet} \longrightarrow H_2O_2 \longrightarrow H_2O + HO^{\bullet} \longrightarrow 2 H_2O$$

Se generan pues como intermediarios especies que son mucho más reactivas que el oxígeno en su estado fundamental (triplete).

Los organismos biológicos poseen sofisticados sistemas de regulación de estas reacciones, de manera de ejecutarlas eficientemente cuando son necesarias, y al mismo tiempo brindar protección a su material sensible a esas especies (como proteínas, ADN y lípidos). Esos sistemas son enzimáticos y no enzimáticos, e involucran centralmente a los citocromos. Escapa totalmente a este trabajo la descripción de los numerosos citocromos y de sus funciones. Recalcamos solamente que en todos ellos la cupla Fe(III)/Fe(II) interviene en la transferencia electrónica. Para una descripción de los citocromos desde la óptica de la Química Inorgánica, puede consultarse a Baran (1995).

Mencionaremos al pasar una de las enzimas involucradas en estas reacciones, la bien conocida catalasa, que cataliza en forma muy eficiente la descomposición del agua oxigenada, evitando que ésta se acumule. La catalasa está constituida por cuatro subunidades que contienen grupos heme. En este caso sin embargo la cupla involucrada es Fe(IV)/Fe(III).

La relevancia del ciclo redox Fe(III)/Fe(II) en la generación y en control de las especies altamente oxidantes del oxígeno, como radical hidróxido, hidroperóxido, agua oxigenada, etc. es puesta en evidencia por el ciclo de Haber-Weiss y los procesos de Fenton y de foto-Fenton.

Fe²⁺ + H₂O₂
$$\rightarrow$$
 Fe(III) + •OH + OH⁻
•OH + H₂O₂ \rightarrow H⁺ + O₂⁻ + H₂O
H⁺ + O₂⁻ + H₂O₂ \rightarrow OH + H₂O + O₂
Fe²⁺ + •OH \rightarrow Fe(III) + OH⁻

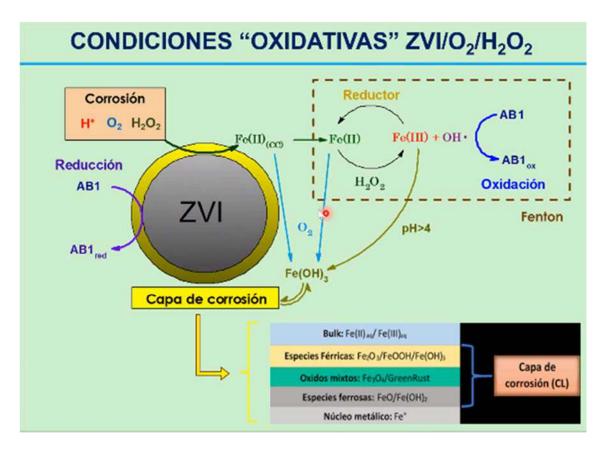


Fig. 10. Las reacciones que tienen lugar al introducir partículas de hierro en soluciones con contaminantes orgánicos. De: García Einschlag (2020).

Al margen de su importancia en sistemas biológicos, estos ciclos están involucrados en varias tecnologías de remoción de contaminantes, como las que se basan en el proceso Fenton, en el foto-Fenton y en el uso de hierro cero valente (ZVI). En esencia, se busca generar especies reactivas de oxígeno para que éstas degraden contaminantes orgánicos no biodegradables. En particular, en el proceso que usa hierro cero valente, entra también en juego la formación y disolución de óxidos sobre el sustrato (partículas de hierro metálico). La Fig. 10 ilustra el complejo juego de la química del hierro involucrada en el proceso (García Einschlag 2020).

6. Descontaminación química de superficies metálicas en tecnología nuclear

Vamos a describir ahora el desarrollo tecnológico de un procedimiento de descontaminación de superficies metálicas, llevado a cabo para las centrales nucleares Atucha I y Embalse. éste fue uno de los grandes desafíos del Departamento Química de Reactores en las décadas de 1980 y 1990.

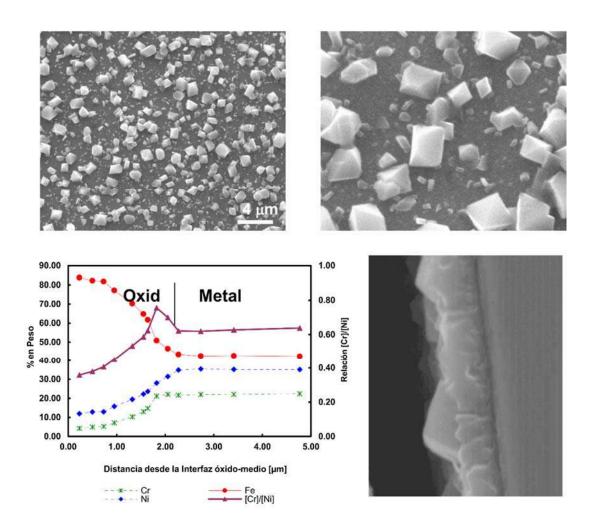


Fig. 11. Arriba: vista de la capa de óxidos generados sobre aleación 800 en autoclave a 350°C, en agua alcalinizada (en dos magnificaciones). Abajo: a la izquierda, perfil EDS de la composición química del metal y de los óxidos (notar la posición de la superficie del metal, alrededor de 2,2 μm desde la interfaz óxido/solución). A la derecha, corte metalográfico de la zona explorada por EDS. De Olmedo y Bordoni (2005).

Los tubos de los generadores de vapor de las centrales tipo PWR (pressurized water reactor) (incluido PHWR – pressurized heavy water reactor- como Atucha) se van recubriendo de una delgada capa de óxido, que crece por corrosión del metal base y que incorpora desde el agua diversos componentes, muy especialmente ⁶⁰Co. Eventualmente se vuelve necesario descontaminar esas superficies: disolver por ataque químico los óxidos crecidos y depositados. Estos óxidos son mayoritariamente óxidos de hierro, pero también tiene una capa pasivante crucial de óxidos de cromo. La Fig. 11 muestra los óxidos crecidos sobre cupones de Aleación 800, un acero inoxidable austenítico estabilizado con Ti y con un alto contenido de Ni (32.5-35.0 % en peso) y Cr (21-23 % en peso) que se usa en los tubos de los generadores de vapor (Olmedo y Bordoni, 2005).

El desarrollo El comportamiento del cromo es apreciablemente diferente al del hierro, como se ve en su diagrama de Pourbaix (Fig. 12). A pesar de la similitud que aparece a primera vista con el diagrama del hierro, los campos de estabilidad de las especies están fuertemente desplazados hacia abajo, hacia potenciales más negativos, con lo que la oxidación se vuelve más fácil y la reducción más difícil.

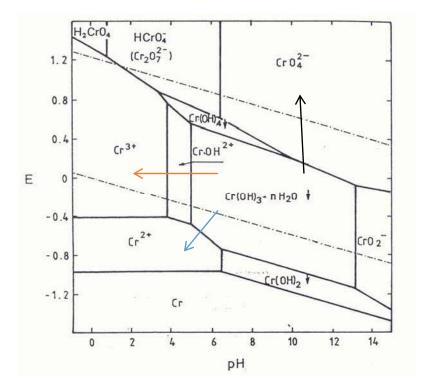


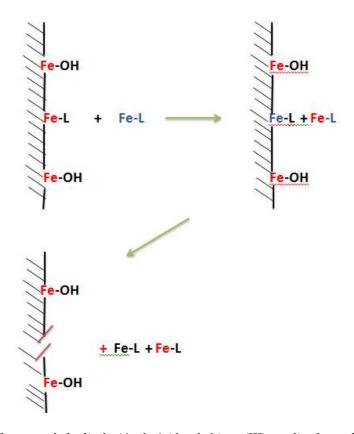
Fig. 12. Diagrama de Pourbaix del cromo. Las flechas indican posibles caminos de disolución del óxido de cromo(III): negra, oxidativa; roja: ácida; azul: reductiva.

Si reducimos el Fe^{3+} del óxido Fe_2O_3 a Fe^{2+} , podemos disolverlo con más facilidad, y algo análogo ocurriría con el cromo. La reducción del Fe^{3+} es factible y funciona, pero la del Cr^{3+} es prohibitiva por los potenciales redox necesarios. A la inversa, si oxidamos el Cr^{3+} a cromato lo podemos disolver, y el proceso es factible; en cambio la oxidación del Fe^{3+} a ferrato es prohibitiva.

Nosotros estudiamos en detalle los mecanismos de disolución de los óxidos de hierro y de cromo, reductivos en el primero y oxidativos en el segundo, y ello permitió dar con una formulación racional de los solventes que se usan para la descontaminación química (Blesa et al. 1983, 1987, 1993; García Rodenas et al. 1997). En particular, estudiamos el uso conjunto de reductores y de agentes complejantes en medio ácido para disolver los óxidos de hierro. Pudimos demostrar que los reductores pueden catalizar la disolución ácida, sin necesidad de reducir todo el hierro para disolverlo. Los propios iones ferrosos son adecuados para ello.

Se debe notar que la disolución reductiva de los óxidos de hierro(III) implica la transferencia electrónica interfacial, desde el reductor disuelto —o adsorbido- a los centros de Fe(III) del sólido —en superficie. Esa transferencia electrónica debe ir acompañada, de manera muy sincronizada, con la transferencia de protones para compensar cargas.

La Fig. 13 muestra esquemáticamente lo que ocurre. Si ponemos un óxido de hierro(III) sólido en contacto con una solución ácida que contiene agentes complejantes como el EDTA, la disolución es factible desde el punto de vista termodinámico, pero puede ser extremadamente lenta. Si en la solución hay sales ferrosas, se produce un intercambio electrónico entre estos iones disueltos y los iones férricos del sólido. Se genera un ion ferroso en la superficie del sólido, y el ferroso disuelto se transforma en férrico; éste no precipita, porque es complejado por el EDTA. A su vez, el ferroso de la superficie se disuelve, porque es mucho más lábil que el férrico. Recuperamos pues el ion ferroso en solución, y el proceso se repite. Este proceso se conoce como disolución ácida por complejantes, catalizada por reductores.



 ${\bf Fig.~13.}~{\bf Esquema~de~la~disoluci\'on~de~\'oxidos~de~hierro (III)~catalizada~por~hierro (II).$

No voy a discutir mecanismo de intercambio electrónico en la dupla Fe(III)/Fe(II), ni en solución ni en interfaces, que es tema para un artículo más especializado, remiténdome solamente al libro. *Chemical dissolution of metal oxides* (Blesa et al. 1994).

Volvamos al problema tecnológico. Normalmente estos procesos usan dos etapas, una oxidativa para remover el cromo como cromato, y una reductiva para remover el hierro como Fe^{2*} o Fe³⁺ complejado con ácidos policarboxílicos. Desarrollamos procesos, patentamos uno de ellos, asesoramos a Atucha I en el tema, etc. Pero más que hablar de eso quiero mencionar un proyecto que se transformó en el recuerdo de un fracaso.

¿Por qué no desarrollar un proceso de una sola etapa, reemplazando las dos etapas —oxidante y reductora- por un proceso de tipo Belusov-Zhabotinsky?

La descontaminación química convencional usa permanganato en la etapa oxidante, y ácidos c|arbóxilicos como el malónico o el EDTA en la otra etapa. La reacción B-Z tiene lugar cuando se mezclan por ejemplo, bromato (un oxidante similar al permanganato) y ácido malónico, en presencia de un catalizador (la cupla Ce(IV)/Ce(III)).

En esas condiciones, se genera un ciclado del potencial redox de la solución, que es lo mismo que se necesita para disolver los óxidos. Es más, es conocida desde hace mucho tiempo la disolución oscilante de hierro en ácido nítrico.

$$3 \text{ CH}_2(\text{CO}_2\text{H})_2 + 4 \text{ BrO}_3^- \xrightarrow{\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}} 4 \text{ Br}^- + 9 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$$

Sin embargo, la reacción B-Z ocurre en presencia de los óxidos, pero la frecuencia de las oscilaciones químicas es demasiado alta para acoplar la disolución al proceso BZ propiamente dicho. Este ejemplo sirve para recalcar que el camino del éxito tecnológico está empedrado de fracasos de los cuales se aprende mucho.

Cabe mencionar una alternativa biomimética, usando sideróforos para capturar Fe(III|). También pensamos en esta alternativa para el problema de tecnología nuclear, pero lógicamente la misma es inviable por las cantidades que se necesitan (y sus costos) y también por los campos de radiación que destruirían los sideroforos.

7. La química ambiental del cromo

Esta reseña se centró en las reacciones de la cupla Fe(III)/Fe(II) en el ambiente, en los organismos biológicos, y en la tecnología. En esta última aplicación, el comportamiento del cromo se volvió importante como para examinarlo. La cupla más importante en el caso del cromo es Cr(VI)/Cr(III). Mientras que los óxidos de cromo(III) son muy poco solubles, los cromatos se disuelven bien. Es así que la movilización del cromo en sistemas acuosos

ocurre por oxidación de los óxidos de cromo y disolución en los cuerpos de agua de los cromatos. Si a este hecho se le suma que el anión cromato es tóxico y mutagénico (Srinivasan y Seshan, 2011), el resultado es que la incorporación de cromato a las aguas es un factor de contaminación severo.

Una variedad de oxidantes, como el permanganato mencionado antes, pueden movilizar al cromo por esta vía (Reartes et al.1991). La complejación también permite disolver el Cr(III), especialmente si se cataliza la disolución con una sal de Cr(II) (García Rodenas et al. 1997).

8. El proceso inverso: la precipitación como método de síntesis de materiales basados en óxidos de hierro

La síntesis suave de materiales basados en óxidos de hierro se basa en la precipitación controlada a partir de soluciones acuosas. Por "controlada" se entiende que se puede dirigir la síntesis para obtener sólidos de composición química bien establecidas, de la estructura cristalina deseada, y compuesta por partículas de forma y tamaño controlados. El esquema siguiente muestra las etapas de formación de estos sólidos desde las soluciones acuosas.



Hay varios puntos claves:

En primer lugar, se produce la formación de pequeños oligómeros o polímeros solubles, y la estructura de éstos define el rumbo posterior. Es por eso que los aniones presentes tienen mucha importancia en la definición de las fases sólidas obtenidas. Es así que la oxidación de sales ferrosas dirige la síntesis de forma distinta que la hidrólisis de sales férricas (Domingo Pascual et al. 1993).

También es crucial la forma de obtener grados de sobresaturación controlados. Se ha recurrido para ello a la alcalinización homogénea que se logra mediante la hidrólisis controlada de la urea u otros precursores de álcalis. Analizamos este tema en detalle en Soler-Illia et al. (1998).

La gran variedad de fases, y el tamaño y la morfología de las partículas ha sido revisada en Blesa y Matijević, 1989). Mencionemos solo, para terminar, algunos de los óxidos obtenidos por esta vía: magnetita (Regazzoni et al. 1981), hematita y akaganeíta (de Blanco et al. 1986), maghemita (Domingo Pascual et al. 1991), goetita y lepidocrocita (Domingo Pascual et al. 1994), ferrita de níquel (Regazzoni y Matijevic 1982), ferrita de bario (Jacobo et al. 1997) y goetitas sustituidas con cromo (Sileo et al. 2004).

Referencias

- Baran EJ (1995) Química Bioinorgánica. McGraw Hill/Interamericana de España, pp. 1-304. ISBN: 84-481-1816-2.
- Blesa MA, Weisz AD, Morando PJ, Salfity JA, Magaz GE, Regazzoni AE (2000) The interaction of metal oxide surfaces with complexing agents dissolved in water. Coordination Chemistry Reviews, 196:31-63.
- Blesa MA, Marinovich HA, Baumgartner EC, Maroto AJG (1987) Mechanism of dissolution of magnetite by oxalic acid ferrous ion solutions. Inorganic Chemistry 26:3713-3717.
- Blesa MA, Baumgartner EC, Marinovich HA, Maroto AJG (1983). Heterogeneous electron transfer as a pathway in the dissolution of magnetite in oxalic acid solutions. Inorganic Chemistry, 22:2224-2226.
- Blesa MA, Matijević E (1989) Phase transformations of iron oxides, oxohydroxides and hydrous oxides in aqueous media. Advances in Colloid and Interface Science, 29:173-221.
- Blesa MA, Maroto AJG, Regazzoni AE (1993). Inorganic chemistry of the decontamination of steel surfaces. Research Trends-Trends in Inorganic Chemistry, 3:25-37.
- Blesa MA, Morando PJ, Regazzoni AE (1994) Chemical dissolution of metal oxides. CRC Press, Boca Raton (EEUU), pp. 1-401.
- Cloud Jr. PE (1968), Atmospheric and hydrospheric evolution on the primitive earth. Both secular accretion and biological and geochemical processes have affected earth's volatile envelope. Science, 160:729-736.
- Connoly EL, Guinot ML (1998). Reduction and uptake of iron in plants. En: Asard H, Bérczi A, Caubergs RJ (eds.), Plasma membrane redox systems and their role in biological distress and disease. Springer (Holanda), pp. 179-192.
- de Blanco EK, Blesa MA, Liberman SJ (1986) Comments on the mechanism of the akaganeite-hematite phase transformation in hydrothermal solutions. Reactivity of Solids, 1:189-194.
- Domingo Pascual C, Rodríguez-Clemente R, Blesa MA (1993) Nature and reactivity of intermediates in the autooxidation of iron(II) in aqueous acid media. Solid State Ionics 59:187-195.
- Domingo Pascual C, Rodríguez-Clemente R, Blesa MA (1994) Morphological properties of alpha-FeOOH, gamma-FeOOH and Fe3O4 obtained by oxidation of aqueous Fe(II) solutions. Journal of Colloid and Interface Science, 165:244-252.
- Domingo Pascual C, Rodríguez-Clemente R, Blesa MA (1991) The pathways to spinel iron oxides by oxidation of iron(II) in basic media. Materials Research Bulletin, 26:47-55.
- García Einschlag F. (2020). Seminario Instituto de investigación e Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de San Martín.
- García Rodenas LA, Iglesias AM, Weisz AD, Morando PJ, Blesa MA (1997). Surface complexation description of the dissolution of chromium (III) hydrous oxides by oxalic acid. Inorganic Chemistry, 36:6423-6430.
- Granier T, Langlois d'Estaintot B, Gallois B (2003) Structural description of the active sites of mouse L-chain ferritin at 1.2 Å resolution. Journal of Biological Inorganic Chemistry, 8:105–111.
- Holland HD (2006) The oxygenation of the atmosphere and oceans. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 361:903-915.

- Jacobo SE, Domingo Pascual C., Rodríguez-Clemente R, Blesa MA (1997) Synthesis of ultrafine particles of Barium Ferrite by chemical coprecipitation. Journal of Materials Science, 32:1025-1028.
- Johnson CM, Beard BL, Klein C, Beukes NJ, Roden EE (2008) Iron isotopes constrain biologic and abiologic processes in banded iron formation genesis. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72:151-169.
- Leeper FJ (1985) The biosynthesis of porphyrins, chlorophylls, and vitamin B12. Natural Products Reports, 2:19-47.
- Olmedo AM, Bordoni R (2005) Comportamiento del acero al carbono y aleación 800 en medio acuoso a alta temperatura. Jornadas SAM/CONAMET 2005 MEMAT 2005, Mar del Plata (Argentina).
- Reartes GB, Morando PJ, Hewlett P, Matijevic E, Blesa MA (1991) Reactivity of Chromium Oxide in aqueous solutions. Part I: Oxidative dissolution. Chemistry of Materials 3:1101-1106.
- Regazzoni AE, Matijevic E (1982). Formation of spherical colloidal nickel ferrite particles as model corrosion products. Corrosion, 38:212-217.
- Regazzoni AE, Urrutia GA, Blesa MA, Maroto (1981) Some observations on the composition and morphology of synthetic magnetites obtained by different routes. Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry, 43:1489-1493.
- Sánchez Suárez J (1996) Capacidad coordinante del hierro (III) con ácidos tetrametilcarboxílicos derivados de orto-fenilendiaminas. Capacidad coordinante del hierro (III) con ácidos tetrametilcarboxílicos derivados de orto-fenilendiaminas. Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna (España).
- Sileo EE, Ramos AY, Magaz GE, Blesa MA (2004) Long-range vs. short range ordering in synthetic Cr-substituted goethites. Geochimica et Cosmochimica Acta 68:3053-3063.
- Soler-Illia G, Jobbágy M, Candal RJ, Regazzoni AE, Blesa MA (1998) The synthesis of metal oxide particles from aqueous media: The homogeneous alkalinization method. Journal of Dispersion Science and Technology, 19:207-229.
- Srinivasan S, Seshan R. (2011) Chromium in biology. En: Chromium -VI Reagents: Synthetic Applications. Springer Briefs in Molecular Science. Springer, Berlin (Alemania). DOI: 10.1007/978-3-642-20817-1_6



Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Argentina Tomo 72, 2021

INFERENCIA ROBUSTA: UN TRAYECTO DE LO FINITO A LO INFINITO-DIMENSIONAL*

Graciela Boente

Departamento de Matemáticas e Instituto de Cálculo, Universidad de Buenos Aires y CONICET. Email: gboente@dm.uba.ar

*Trabajo presentado por G. Boente en oportunidad de su incorporación como Académica Titular de la ANCEFN (31 de julio de 2020) (https://www.youtube.com/watch?v=GMDiAU-t520)

Palabras clave

Análisis de datos funcionales Datos atípicos Regresión no paramétrica Robustez Suavizado Resumen El avance de las nuevas tecnologías ha hecho necesario desarrollar procedimientos estadísticos para estimar funciones o para analizar datos que corresponden a realizaciones de un proceso estocástico. Muchos de los procedimientos utilizados se basan en las mismas ideas que el estimador de mínimos cuadrados en el modelo de regresión lineal siendo por lo tanto muy sensibles a la presencia de un pequeño porcentaje de datos anómalos. En este trabajo, se presentan algunos de los avances obtenidos para definir métodos de inferencia confiables cuando la muestra puede contener datos atípicos tanto para modelos de regresión noparamétrica y semiparamétrica como para el análisis de datos funcionales.

Keywords

Functional data analysis Nonparametric regression Outliers Robustness Smoothing Abstract Robust inference: a path from the finite to the infinite-dimensional setting. The development of new technologies clarified the need of developing new statistical procedures to estimate functions or to analyse data that correspond to realizations of a stochastic process. Many of the standard procedures used are based on the same ideas as the least squares estimator in the linear regression model, being therefore very sensitive to the presence of a small percentage of atypical data. In this paper, we present some of the advances obtained to define reliable inference methods when the sample can contain atypical data both for nonparametric and semiparametric regression models and for functional data analysis.

1. Introducción

La palabra *Estadística* fue introducida en el siglo XVIII por el filósofo y economista alemán Gottfried Achenwall en 1749 y por el político inglés Sir John Sinclair en 1791, para indicar el análisis de datos de estado, es decir, datos completos sobre todos los habitantes de un país, ver van der Zande (2010). Adquirió el significado de la recopilación y clasificación de datos en general a principios del siglo XIX. Cabe mencionar que los datos del censo en esa época representan al día de hoy lo que llamamos *Big Data* y era necesario procesarlos y darles un orden para resumir la información subyacente.

Las bases de la Estadística Matemática surgieron con el apoyo de la Teoría de Probabilidades a principios del siglo XX con Francis Galton, Karl Pearson y Ronald Fisher, entre otros. Más allá de los desarrollos que sirven de fundamento para los procedimientos de inferencia estadística, la implementación de técnicas gráficas que permitió una rápida y sencilla visualización de las observaciones y de sus características tuvo un fuerte impacto. En el campo de la Bioestadística podemos mencionar a Florence Nightingale que fue pionera en el desarrollo de métodos gráficos entre otros para ilustrar el número de muertos por enfermedades o por heridas en la Guerra de Crimea, en relación al número de soldados de cada mes, o sea las tasas de mortalidad. En su honor el período Mayo de 2020 a Julio de 2021 fue declarado el Año Internacional de la Mujer en Estadística y Ciencia de Datos por coincidir con el 200 aniversario de su nacimiento, ver https://www.isiweb.org/iywsds. Por otra parte, diversos métodos graficos surgieron en la segunda mitad del siglo XX para detectar observaciones atípicas, o sea, observaciones cuyo comportamiento se aleja de la mayoría de los datos, entre los cuales el más conocido es el boxplot propuesto por Tukey (1970), ver también McGill et al. (1978).

El uso de la palabra *Robustez* fue dado por primera vez en un trabajo de Box (1953) quien escribe sobre la destacable propiedad de robustez a la nonormalidad que poseen los tests para comparación de medias en contraposición con los tests para comparar varianzas. Los desarrollos inciales de procedimientos robustos fueron dados por Tukey (1960) quien destacó la extrema sensibilidad de algunos procedimientos de inferencia estadística convencional a pequeñas desviaciones de los supuestos que los sustentan. Las bases de la inferencia robusta se sentaron en la década del 60/70 con los trabajos, entre otros, de Huber (1964, 1967, 1968) y Hampel (1968, 1971, 1974). En particular, Hampel (1968) caracterizó la robustez de un estimador a través de la continuidad del funcional asociado e introdujo nociones como el punto de ruptura y la función de influencia.

Más de cincuenta años después del trabajo de Huber (1964) sobre Mestimadores de posición, los procedimientos robustos son una elección popular para brindar protección ante la presencia de *outliers*. Como describen los autores antes mencionados, los datos atípicos o *outliers* pueden corresponder

a datos incorrectamente reportados o a errores de medición cuya distribución tiene, por ejemplo, colas más pesadas que la distribución normal. En particular, en el modelo de regresión lineal $y = \alpha + \beta x + \varepsilon$ es bien conocido que un pequeño porcentaje de datos atípicos tienen una influencia inusualmente grande en los estimadores de mínimos cuadrados que son los clásicamente utilizados.

Así como el método de mínimos cuadrados se basa en el supuesto de que el error ε tiene distribución normal, y es muy sensible al apartamiento de este supuesto, muchos de los procedimientos estadísticos se fundamentan, directa o indirectamente, en ciertos supuestos sobre lo que se sabe o se supone de los datos. Estos modelos suelen ser simplificaciones o idealizaciones de la realidad y por ello, en muchas ocasiones sólo podemos suponer que el modelo vale aproximadamente, en el sentido, que la distribución de las observaciones se encuentra "cerca" en algún sentido de la postulada por procedimientos como el de máxima verosimilitud o el de mínimos cuadrados, que denominaremos de ahora en más métodos clásicos. Esto puede ser el caso cuando el modelo normal describe el comportamiento de la mayoría de los datos pero algunas observaciones siguen otro patrón y suelen encontrarse lejos del grueso de los datos. Estos comentarios muestran que es necesario desarrollar estrategias para tratar con modelos que se reconocen como imprecisos y es por ello que, desde la década del 80 del siglo XX, en particular en el modelo de regresión lineal, se desarrollaron diversos procedimientos que combinan simultáneamente alta eficiencia en el modelo ideal y resistencia a la presencia de observaciones atípicas. Asimismo, hubo avances en procedimientos estadísticos que suponen modelos más flexibles que los modelos de regresión paramétricos, permitiendo estructuras más generales como es el caso de modelos de regresión noparamétricos, en los que la función de regresión sólo se supone derivable, por ejemplo.

El desarrollo de métodos robustos se amplió a otros ámbitos como el de los modelos lineales generalizados, los modelos de regresión noparamétricos o semiparamétricos, el problema de componentes principales o el de correlación canónica, de modo a obtener resultados confiables, aún en presencia de datos atípicos (outliers) y perdiendo, simultáneamente, poca eficiencia si el modelo asumido por la alternativa clásica es válido. Una completa descripción de los últimos avances sobre procedimientos robustos en modelos paramétricos y la teoría subyacente puede verse en Maronna et al. (2019), mientras que algunas propuestas en modelos de regresión noparamétrica pueden verse en Huber (1979) y Härdle (1990).

Como se ha discutido ampliamente en la literatura, ver por ejemplo Galeano y Peña (2019), la explosión de datos de los últimos años hace que el desarrollo y estudio de procedimientos robustos sea muy relevante ya que distintos tipos de errores y *outliers* pueden ocurrir en la era actual del *Big Data*. Este problema es de especial importancia al trabajar con datos funcionales complejos como pueden ser curvas, imágenes o películas donde no

es posible tener una fácil visualización que permita detectar las observaciones espurias debido a los distintos patrones de anomalías que pueden existir. Estos hechos ya habían sido descriptos en Huber (2010) que mencionaba que en conjuntos de datos recopilados por seres humanos se suelen cometer errores groseros, de forma más o menos aleatoria, con una frecuencia global entre el 1% y el 10%. Sin embargo, con la recopilación de datos más o menos automatizada, surgen nuevos tipos de errores groseros que pueden ser sistemáticos y difíciles de identificar por lo que son necesarias nuevas estrategias para lidiar con ellos.

Tanto el reciente libro de Maronna et al. (2019) como los libros de Heritier et al. (2009) y Huber y Ronchetti (2009) se centran en el problema de inferencia robusta cuando tratamos con parámetros finito-dimensionales, como es el caso de los coeficientes en un modelo de regresión lineal o del vector de direcciones principales en el análisis de componentes principales, más aún suponen que las observaciones pertenecen al espacio euclídeo \mathbb{R}^p , por lo que dichos procedimientos no se pueden aplicar en forma directa al caso de datos funcionales. Por esta razón, en este trabajo intentaremos describir algunos de los avances que se han obtenido en el ámbito de la inferencia robusta, tanto en datos funcionales como en el problema estimación de funciones de regresión. El resto trabajo está organizado de la siguiente forma. En la Sección 2 se discute el problema de estimación robusta en problemas de regresión noparamétrica así como los desafíos que surgen cuando el número de covariables aumenta. En la Sección 3 se presenta el problema de inferencia cuando los datos provienen de curvas, imágenes o más precisamente, cuando corresponden a objetos de dimensión infinita. Algunos comentarios finales se dan en la Sección 4.

2. El estudio de objetos de dimensión infinita

Como consecuencia del avance de la tecnología ya a partir 1980 era posible representar y estimar funciones, como la función de densidad y de regresión y representarlas de forma relativamente rápida en las pantallas de la computadora. En esa época, aparecieron diversos trabajos relacionados con el estudio de estos objetos que, a diferencia del caso de regresión lineal, eran de dimensión infinita ya que no se suponía un modelo que dependiera de un número finito de parámetros desconocidos.

El modelo de regresión noparamétrica supone tradicionalmente que se tienen observaciones $(y_1, x_1), ..., (y_n, x_n)$, independientes e idénticamente distribuidas (i.i.d.), tales que las covariables tienen soporte en un intervalo acotado \mathcal{I} y cumplen $y_i = \eta(x_i) + \varepsilon_i$, donde el error ε_i es independiente de x_i y $\mathbb{E}(\varepsilon_i) = 0$. Por lo tanto, $\eta(x)$ representa la esperanza condicional de $y_1|x_1 = x$. En este caso, el objeto de estudio no es un parámetro de dimensión finita sino una función $\eta: \mathcal{I} \to \mathbb{R}$ que se supone suave, por ejemplo, Lipschitz o de clase $\mathcal{C}^2(\mathcal{I})$.

estimadores propuestos por Nadaraya-Watson (1964) promedios locales pesados y por lo tanto, se ven muy afectados por la presencia de datos anómalos, en particular, si estas respuestas atípicas corresponden a las variables independientes cercanas al punto x_0 donde se desea estimar la función η. Ya en el año 1977 Brillinger, en su discusión del trabajo de Stone (1977) mencionaba que estimadores de tipo M en este modelo eran necesarios para obtener robustez frente a outliers. Härdle (1990) también resalta la importancia de obtener estimaciones resistentes frente a outliers desde el punto de vista del análisis de datos ya que comportamiento errático de dicho estimador puede ocasionar formulaciones paramétricas sesgadas. Estimadores robustos en el contexto noparamétrico pueden definirse como no sensibles a un outlier vertical aislado. En este contexto, se definieron distintos procedimientos robustos para estimar la función η cuando los errores no necesariamente tienen primer momento. Podemos mencionar entre otros los trabajos de Härdle y Tsybakov (1988), Boente y Fraiman (1989a y b, 1990) y Boente et al. (2009) que estudian procedimientos basados en núcleos tanto en el caso de observaciones independientes como dependientes y aún cuando hay respuestas faltantes, respectivamente. Una revisión de distintos procedimientos que conducen a estimadores robustos en el problema de regresión noparamétrica puede verse en Härdle (1990), mientras que, para el caso de una sóla variable explicativa, alternativas robustas basadas en splines y sus propiedades fueron consideradas por Huber (1979), Cox (1983), Cunningham et al. (1991) y, más recientemente, por Kalogridis (2020) y Kalogridis y Van Aelst (2021).

Es importante destacar el rol que juega la suavidad de la función a estimar. Como menciona Hampel también en su comentario del trabajo de Stone (1977) "to talk about robustness is meaningless or, rather, hopeless in the case of a completely arbitrary model; for a model with wild spikes and a nice model with some distant gross errors superimposed are indistinguishable. If we believe in a "smooth" model without spikes, however, then some robustification is possible. In this situation, a clear outlier will not be attributed to some sudden change in the true model, but to a gross error, and hence it may be deleted or otherwise made harmless."

Para ilustrar el efecto de datos anómalos en la función de regresión consideraremos un conjunto de datos que corresponde a 153 mediciones diarias de calidad de aire en la región de Nueva York entre Mayo y Septiembre de 1973. Dicho conjunto fue analizado en Chambers et al. (1983) y puede encontrarse en el data set airquality del paquete R que es un software abierto de análisis estadístico. El interés es explicar la concentración de ozono (" 0_3 ", medido en partes por billón) a través de una función de 3 variables explicativas potenciales: temperatura ("Temp", en grados Fahrenheit), velocidad del viento ("Wind", en millas por hora) y radiación solar medida en la banda de frecuencias 4000-7700 ("Solar.R", en Langleys). Consideraremos los 111 casos que no tienen datos faltantes y a modo de ilustración

estudiaremos la relación entre Ozono y Temperatura. El diagrama de puntos correspondiente a estas dos variables se presenta en la Fig. 1A.

La Fig. 1B muestra en rojo la estimación de $\eta(x_0)$ obtenida mediante la media local en el punto $x_0=75$ con ventana h=4.76, es decir, promediando los valores de ozono correspondientes a temperaturas entre x_0-h y x_0+h . Por otra parte, la Fig. 1C presenta la estimación obtenida al usar pesos basados en el núcleo normal como un triángulo violeta junto con dicho núcleo en violeta. Dicha estimación corresponde al estimador de Nadaraya—Watson y puede definirse como

$$\hat{\eta}(x_0) = \left\{ \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x_i - x_0}{h}\right) \right\}^{-1} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x_i - x_0}{h}\right) y_i,$$

siendo (y_i, x_i) el i-ésimo vector observado con coordenadas el ozono y la temperatura, respectivamente y $K(u) = \exp(-u^2/2)$ el núcleo normal. Finalmente, la Fig. 1D muestra el suavizador lineal en rojo y el M-estimador local en azul. Como vemos los puntos con valores altos de ozono alrededor de 80 grados, afectan el suavizador lineal. El M-estimador puede definirse como la solución en a de la ecuación

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} K\left(\frac{x_i - x_0}{h}\right) \psi\left(\frac{y_i - a}{\hat{\sigma}}\right) = 0$$

donde $\hat{\sigma}$ es un estimador preliminar robusto de la escala del error, $K: \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ es el núcleo (en este caso la densidad normal) y h es la ventana que regula el compromiso entre sesgo y varianza. La función ψ es una función acotada que se comporta como la identidad cerca de 0 y puede elegirse como $\psi = \rho'$ donde ρ es una función par, continua, diferenciable, no-decreciente y tal que si $0 \le u < v$ son tales que $\rho(v) < \sup_t \rho(t)$ entonces $\rho(u) < \rho(v)$. La Fig. 2 muestra dos posibles elecciones para la función ρ junto con su derivada ψ .

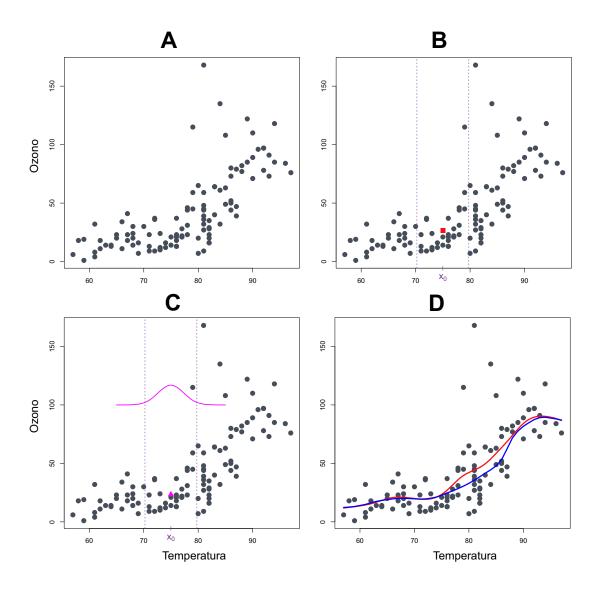


Fig. 1. Datos de ozono versus temperatura (del data set airquality del paquete R). A: Diagrama de puntos. B: El cuadrado rojo indica la media local en $x_0=75$ con ventana h=4.76. C: El triángulo violeta indica el estimador de núcleos utilizando el núcleo normal que sobreimpuso en línea violeta; las rectas verticales cortadas corresponden a x_0-h y x_0+h . D: Las líneas roja y azul corresponden a la estimación de Nadaraya-Watson y al M-estimador local, respectivamente.

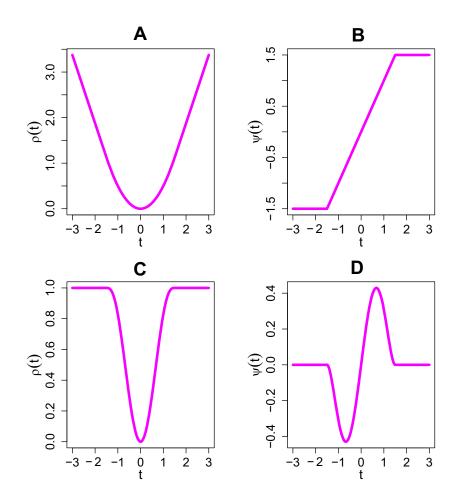


Fig. 2. Función ρ (A y C) con su derivada ψ (B y D). A: Función de Huber ρ(t) = $(t^2/2)$ $I_{|t|≤c}$ + $(c t - c^2/2)I_{|t|>c}$ con c = 1.5 y B ψ(t) = min(c, max(-c, t)). C: Función de Tukey ρ(t) = min(3(t/c)^2 - 3(t/c)^4 + (t/c)^6, 1) con c = 1.5, y D: ψ(t) = $t(1 - (t/c)^2)^2$ $I_{[-c,c]}(t)$.

diferenciables, son del orden $n^{\overline{4+p}}$ siendo n la cantidad de observaciones. Intuitivamente, este fenómeno significa que la cantidad de observaciones necesarias para evitar que los estimadores tengan una varianza inaceptablemente grande crece exponencialmente con la dimensión. Dicho efecto se ve reflejado en las Figs. 3 y 4 que muestran cómo al crecer la dimensión los datos se vuelven cada vez más ralos. La primera muestra los histogramas, correspondientes a 1000 replicaciones, de la distancia entre dos puntos generados con distribución uniforme en el cubo $[0,1]^p$, mientras que la segunda muestra la probabilidad de que una observación en \mathbb{R}^p proveniente de la distribución normal, $N(0_p, \mathbf{I}_p)$, pertenezca a la bola unidad. Estos gráficos muestran que al crecer la dimensión los datos se vuelven cada vez más aislados y ralos dificultando el uso de técnicas de suavizado.

Por esta razón, los supuestos de modelado en la práctica deben centrarse en espacios de funciones con dimensión inherente mucho menor que la del espacio de funciones suaves en *p* variables. Una opción es considerar los así llamados *modelos aditivos*, en los que se restringe la clase de las funciones de regresión suponiendo que la misma es de la forma:

$$\eta(\mathbf{x}) = \mu + \sum_{j=1}^{p} \eta_j(x_j)$$
 donde $\mathbb{E}(\eta_j(x_j)) = 0$.

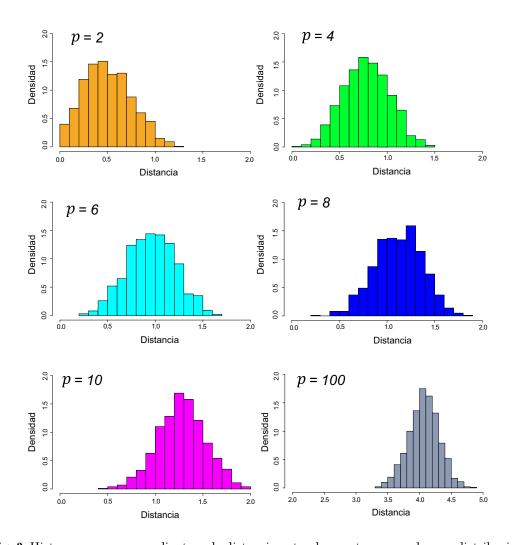


Fig. 3. Histogramas correspondientes a la distancia entre dos puntos generados con distribución uniforme en el cubo $[0,1]^p$, evaluados sobre 1000 replicaciones.

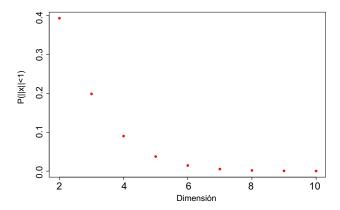


Fig. 4. Gráfico de $P(||x|| \le 1)$ como función de la dimensión p cuando $x \sim N(0_p, I_p)$.

Vale la pena destacar que los modelos aditivos generalizan los modelos lineales y son de fácil interpretación pues cada covariable actúa en forma separada sobre el modelo de regresión. La ventaja de estos modelos es que permite hacer suavizados unidimensionales. Más precisamente, Stone (1985) mostró que bajo un modelo aditivo la tasa óptima para estimar η_j es la tasa uno-dimensional. Hablamos entonces de una reducción de la dimensión.

Para estimar las componentes η_j existen dos métodos comúnmente usados, uno basado en un método iterativo llamado backfitting y el otro basado en el procedimiento de integración marginal. Más precisamente, Buja et al. (1989) y Hastie y Tibshirani (1990) propusieron el procedimiento de backfitting que consisten en estimar las componentes η_j suavizando los residuos parciales

$$\widehat{R}_{ij}^{(\ell)} = y_i - \widehat{\mu}^{(\ell-1)} - \sum_{s=1}^{j-1} \widehat{\eta}_s^{(\ell)}(x_{is}) - \sum_{s=j+1}^p \widehat{\eta}_s^{(\ell-1)}(x_{is})$$

iterativamente en s y ℓ , utilizando, por ejemplo, polinomios locales como los descriptos en Härdle et al. (2004). Como el estimador de Nadaraya-Watson, estos estimadores son sensibles a observaciones atípicas y por esta razón, Boente et al. (2017) consideraron estimadores robustos basados en Mestimadores polinomiales locales (backfitting robusto) obteniendo de esta forma estimadores más resistentes a datos atípicos.

El estimador de integración marginal se basa en la idea intuitiva que, salvo por una constante aditiva, las componentes η_j se pueden recuperar integrando la función η respecto de las demás variables. Linton y Nielsen (1995) mostraron que integrar el estimador de Nadaraya-Watson produce estimadores de las componentes marginales que son asintóticamente normales con tasa de convergencia óptima si p=2. Algunos desarrollos heurísticos, basados en la consistencia del estimador piloto, sugieren que este estimador no convergería con tasa de convergencia óptima en presencia de

más de cuatro covariables. Para resolver este problema, Severance—Lossin y Sperlich (1999) propusieron un estimador basado en polinomios locales adaptivo a la componente a estimar, de modo a obtener tasas uniparamétricas óptimas. Más precisamente, para estimar η_j la propuesta de Severance—Lossin y Sperlich (1999) utiliza polinomios locales solamente para η_j , por lo que en el desarrollo se usan únicamente las covariables x_{ij} . Para resolver la sensibilidad de estos estimadores cuando existen respuestas atípicas en la muestra Boente y Martínez (2017) consideraron una versión robusta del estimador dado en Severance—Lossin y Sperlich (1999). Dicha propuesta robusta se basa en M-estimadores robustos que utilizan un estimador preliminar de escala y polinomios locales en la dirección de interés. Teniendo en cuenta que el procedimiento de integración debe repetirse para cada $1 \le j \le p$, este método es numéricamente más costoso que el backfitting robusto si la dimensión de las covariables es grande.

El análisis de los datos de calidad de aire puede verse en Boente et al. (2017), incluímos aquí los resultados obtenidos para ilustrar la sensibilidad del procedimiento de backfitting y la ventaja de usar estimadores robustos. Para este conjunto de datos, Cleveland (1985) encuentra que la relación entre ozono y velocidad de viento es no-lineal, correspondiendo valores bajos de ozono a altas velocidades del viento. Un ajuste robusto basado en un modelo nolineal fue dado en Bianco y Spano (2019) quienes consideraron un modelo de crecimiento exponencial entre el ozono y la velocidad del viento. Como antes consideramos solamente los 111 casos que no contienen observaciones faltantes. La Fig. 5 ilustra que la relación entre ozono y las demás variables no parece ser lineal, por ello consideramos el modelo aditivo $O_3 = \mu + \eta_1(\text{Temp}) + \eta_2(\text{Wind}) + \eta_3(\text{Solar.R}) + \varepsilon$, donde los errores ε se suponen independientes y con distribución simétrica respecto de 0.

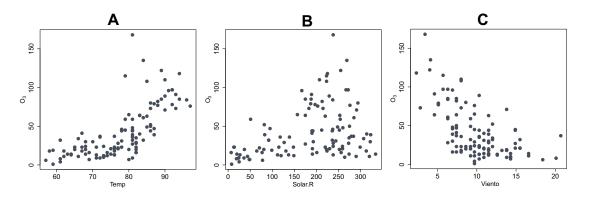


Fig. 5. Datos de ozono versus temperatura (A), velocidad del viento (B) y radiación solar (C). Basado en el data set airquality del paquete R.

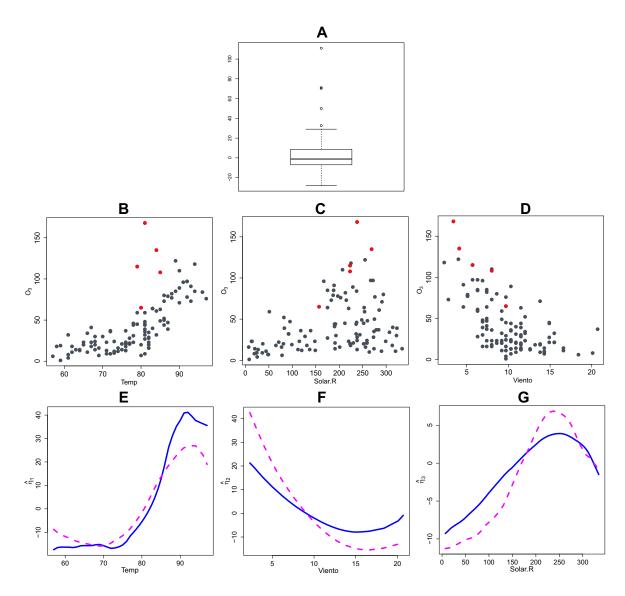


Fig. 6. Datos de calidad de aire. Los datos detectados como atípicos se indican en B-D en rojo. A: Boxplot de los residuos del ajuste robusto. B: Ozono versus temperatura C: Ozono versus velocidad del viento D: Ozono versus radición solar. E-F: Estimaciones clásicas y robustas de las componentes aditivas. El ajuste clásico corresponde a la línea cortada magenta, mientras que el robusto a la línea azul. Basado en el data set airquality del paquete R.

Realizamos un ajuste de los datos utilizando el procedimiento de backfitting clásico propuesto en Buja et al. (1989) y la alternativa robusta definida en Boente et al. (2017) utilizando polinomios locales de grado 1 y en el caso del método robusto consideramos como función de pérdida ρ la función $\rho(t) = \min(3(t/c)^2 - 3(t/c)^4 + (t/c)^6, 1)$ con c = 4.685. Los datos atípicos detectados mediante el boxplot de los residuos del ajuste robusto se indican en rojo en las Fig. 6 B a Fig.6D y vemos la influencia que tienen en el estimador clásico que se presenta en linea cortada magenta en las Fig. 6E a Fig. 6G.

Como muestra la Fig. 7, si realizamos un nuevo análisis mediante el procedimiento de backfitting clásico utilizando ahora la muestra limpia, es

decir, sin las observaciones detectadas como atípicas, obtenemos resultados similares a los del estimador robusto (utilizando todos los datos). De esta forma, el ajuste robusto ponderó automáticamente los potenciales datos atípicos dándoles menor peso y produjo estimaciones de las componentes aditivas η_j que son casi idénticas a las del procedimiento de backfitting clásico una vez detectados y eliminados los valores atípicos. Por otra parte, los residuos del ajuste robusto permitieron identificar esos posibles valores atípicos siendo una herramienta útil de diagnóstico.

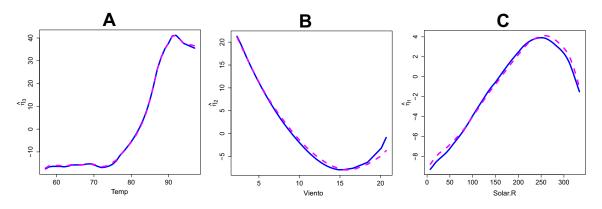


Fig.7. Datos de calidad de aire. Estimaciones clásicas sin los datos atípicos y robustas con todos los datos de las componentes aditivas. El ajuste clásico sin los datos atípicos corresponde a la línea cortada magenta, mientras que el robusto calculado con todos los datos a la línea azul. Basado en el data set airquality del paquete R.

Otra alternativa para lidiar con *maldición de la dimensión* consiste en imponer restricciones paramétricas en algunas variables. Entre este tipo de modelos semiparamétricos se encuentran los modelos parcialmente lineales, modelos de índice simple, modelos parcialmente lineales generalizados o parcialmente lineales de índice simple. Una descripción de distintos procedimientos clásicos para estos modelos pueden verse en Härdle et al. (2004) y Horowitz (2009), mientras que alternativas robustas pueden verse en He y Shi (1996), He et al. (2002), Bianco y Boente (2004) y Bianco et al. (2011) quienes consideraron robustos estimadores en el modelo parcialmente lineal. Por otra parte, Boente et al. (2006) y Boente y Rodriguez (2010) propusieron y estudiaron métodos robustos en modelos parcialmente lineales generalizados. Finalmente, Boente y Rodriguez (2012) y Agostinelli et al. (2020) presentan propuestas robustas en modelos de índice simple. Recientemente, Bravo (2019) propuso estimadores robustos en el contexto de modelos de coeficientes variables cuando hay observaciones faltantes.

3. Los datos son objetos de dimensión infinita

La aparición de las computadoras supuso para la Estadística un cambio con implicaciones en el paradigma metodológico. Ahora es posible trabajar con conjuntos grandes de datos y almacenar la información correspondiente a datos provenientes de fenómenos climáticos como imágenes satelitales, biológicos como resonancias magnéticas así como espectrogramas de sonidos de utilidad en lingüistica. En estos ejemplos los datos corresponden a observaciones discretizadas de un proceso suave, es decir, los datos ahora son curvas u objetos de dimensión infinita. Por ejemplo, para un fenómeno particular, podríamos tener observaciones $X_1(t), ..., X_n(t)$ correspondientes a un proceso estocástico indexado en tiempo $\{X(t), t \in \mathcal{I}\}$.

En las propuestas dadas en los últimos 30 años para estimar distintas características o para hacer test de hipótesis, los datos obtenidos se consideraron como trayectorias completamente observadas. En este contexto fue posible definir, entre otros, procedimientos para estimar el parámetro de regresión, las direcciones principales o canónicas, así como, para testear la igualdad de medias o de operadores de covarianza, que son la versión funcional de la matriz de covarianza, cuando tenemos varias poblaciones independientes ver, por ejemplo, Horváth y Kokoszka (2012).

Si bien el interés científico radica en el proceso estocástico subyacente y sus propiedades, en realidad, este proceso está muchas veces latente y no puede observarse directamente, pues los datos sólo pueden medirse en una grilla de puntos que puede ser fija o aleatoria y puede variar o no de individuo a individuo. Una hipótesis algo más general que suponer que se observa toda la trayectoria consiste en suponer que nuestro dato es una observación discretizada del proceso y que todos los datos se registran en la misma grilla de tiempos $\{t_i\}_{i=1,\dots p}$, con $t_1 \leq \dots \leq t_p$, o sea que observamos $X_{ij} = X_i(t_i)$, $1 \leq \dots \leq t_p$ $i \le n$, $1 \le j \le n$. Si los registros corresponden a un instrumento, como un electroencefalograma o a una imagen por resonancia magnética, la grilla de puntos es usualmente equiespaciada $t_j - t_{j-1} = t_{j+1} - t_j$ para todo j. En tales situaciones, estudiar las componentes de variación mediante las técnicas usuales de componentes principales, correlación canónica o regresión no parece ser lo más indicado. Estas técnicas multivariadas pueden llevar a problemas debido a la falta de regularidad o dar origen a estimadores mal definidos, como en el caso del análisis de correlación canónica donde pueden encontrarse direcciones con correlación canónica muestral 1 si se usan las versiones muestrales multivariadas sin penalizar. Por esta razón, se han desarrollado diversas técnicas de análisis para datos funcionales que sacan provecho del hecho que X o la cantidad a estimar presentan alguna información de regularidad que puede ser explotada de forma funcional, por ejemplo, continuidad o diferenciabilidad.

Cabe mencionar que, en el estudio de las propiedades asintóticas, se supone que el interespaciado $t_{j+1} - t_j$ converge a 0 cuando p crece, de modo que $p = p_n$ es una sucesión que crece a infinito. Como mencionan Wang et al. (2016), a pesar de que valores grandes de p llevan a un problema de alta dimensión, esto también significa que tenemos más datos para obtener información sobre X(t). Por lo tanto, en el estudio de este tipo de objetos, la

alta dimensión es una bendición más que una maldición. Esta bendición se debe justamente a la hipótesis de suavidad de *X* que permite permite sacar provecho de la información de puntos cercanos mediante alguna técnica de suavizado como las mencionadas en la Sección 2. Por lo tanto, la suavidad impuesta sirve como herramienta de regularización y los así llamados *fat data sets* son en este caso beneficiosos. Un contexto mucho más desafiante corresponde al caso en que las trayectorias son esparsas y que ilustraremos al final de esta sección.

Como mencionamos anteriormente, para este tipo de datos, los errores groseros pueden ser frecuentes y difíciles de visualizar. Por ejemplo, los dispositivos de comunicación y control recopilan datos automáticamente utilizando redes inalámbricas de sensores y en algunos casos, debido a falla de baterías o congestión de comunicación, los nodos sensores pueden no grabar los datos correctamente. Estas fallas producirán valores atípicos en los datos registrados y por ellos es importante detectarlos (o limpiarlos) antes de tratar de construir modelos viables.

Una manera de detectar los datos anómalos es mediante el uso de técnicas robustas en el análisis de datos y el posterior análisis de los residuos, la otra opción es utilizar técnicas gráficas como el boxplot funcional.

El boxplot funcional definido por Sun y Genton (2011) utiliza una de las nociones de profundidad funcional, especificamente, la profundidad de bandas definida en López-Pintado y Romo (2009), para definir un orden entre curvas de acuerdo a sus profundidades, siendo $X_{[1]}(t)$ la curva más profunda (o la curva mediana) e $X_{[n]}(t)$ la más alejada o de menor profundidad. Como esta medida depende de la forma de la curva, se consideran dos tipos de outliers: outliers de magnitud y de forma. Los primeros consisten en curvas alejadas y los segundos en curvas con patrones diferentes a las demás curvas. Otras medidas de profundidad podrían utilizarse en su construcción. El lector interesado puede consultar el trabajo de Nieto-Reyes y Battey (2016) para una definición formal de profundidad estadística y para una comparación entre las distintas profundidades definidas en este contexto.

En el boxplot clásico definido por Tukey (1970), la caja representa el 50% de los datos y se obtiene a partir del cuartil inferior (Q_I) y superior (Q_S) , mientras que los bigotes del boxplot son las líneas verticales que se extienden desde la caja indicando la máxima y mínima observación regular (excluyendo los outliers), es decir, las observaciones más extremas dentro del intervalo $[Q_I - 1.5d_I, Q_S + 1.5d_I]$ donde $d_I = Q_S - Q_I$ es la distancia intercuartil. En el caso de datos funcionales, el borde del 50% de la región central se define como el sobre, y representa lo mismo que en el boxplot univariado, la región que contiene el 50% de las curvas centrales. La curva mediana que es la curva más profunda, es una alternativa robusta de medir centralidad. Al igual que en el boxplot usual, en el boxplot funcional, se utiliza el criterio de dilatar 1.5 la región central, como mecanismo para identificar outliers, y así se

construyen las *cercas* del gráfico. Cualquier curva que esté fuera de las cercas, en algún intervalo, puede considerarse como un potencial dato atípico.

En la Fig. 8 se muestra un ejemplo correspondiente al conjunto de datos TECATOR disponible en la librería fda.usc del paquete R y que fue analizado por Ferraty y Vieu (2006).

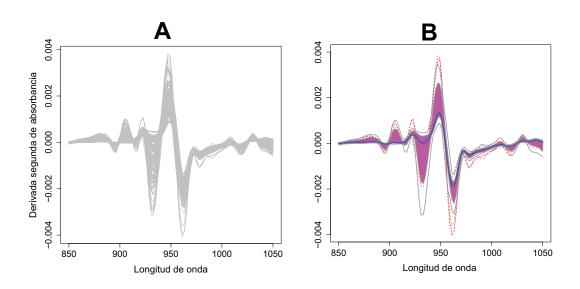


Fig. 8. Conjunto de datos TECATOR disponible en la librería fda.usc del paquete R, derivada segunda de la absorbancia. A: Datos, B: Boxplot funcional.

Este conjunto de datos corresponde a datos de control de calidad de alimentos de 215 muestras de carne finamente picadas con diferentes porcentajes de grasa, proteína y contenido de humedad. Para cada muestra, se midió una curva espectrométrica de absorbancias usando un analizador de alimentos Tecator Infratec en una grilla de 100 longitudes de onda desde 850nm a 1050nm. Los porcentajes de grasa, proteínas y contenido de humedad se determinan por un procedimiento analítico. La Fig. 8 presenta el boxplot funcional de la derivada segunda de la absorbancia. Las líneas cortadas rojas son las curvas detectados como anómalas, la región central o sobre se presenta coloreada en magenta y las cercas se muestran en gris. La línea azul en la parte central corresponde a la curva mediana.

En el caso de datos funcionales, los datos atípicos pueden presentar distintas estructuras. Los *outliers* no necesitan ser datos "extremos", pueden consistir de curvas que se comportan en forma diferente a las demás o que presentan un comportamiento persistente en nivel, amplitud y/o forma. Hubert et al. (2015) dan una descripción de distintos tipos de datos anómalos que se pueden encontrar en una muestra y los clasifican como los *outliers* aislados o sea, datos que muestran un comportamiento atípico durante un

intervalo de tiempo corto o datos atípicos persistentes, que se definen como datos funcionales que son anómalos en gran parte o en todo el dominio. Entre estos últimos distinguimos *outliers* en nivel, amplitud y/o forma.

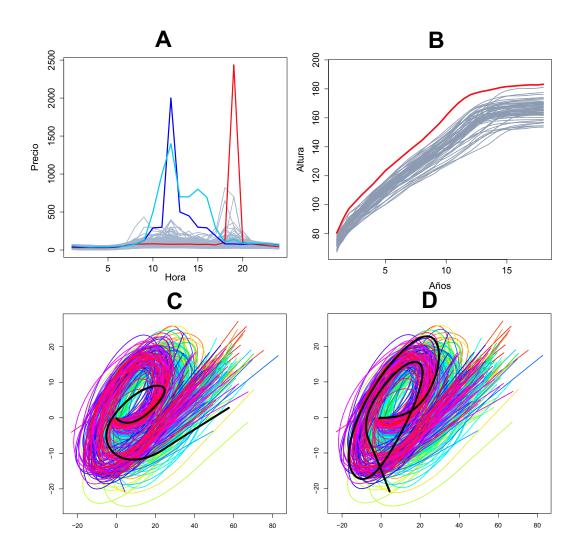


Fig. 9. A: Datos de electricidad en Alemania (de Liebl, 2013) con *outlier* aislado en rojo. B: Datos de altura de niñas (del Berkeley Growth Study, disponibles en la librería fda de R), con *outlier* de nivel en rojo, C y D: Datos de escritura de letra "e" en una tableta WACOM (de Bache y Lichman, 2013). Se destacan en negro un dato atípico de amplitud (C) y uno de forma (D).

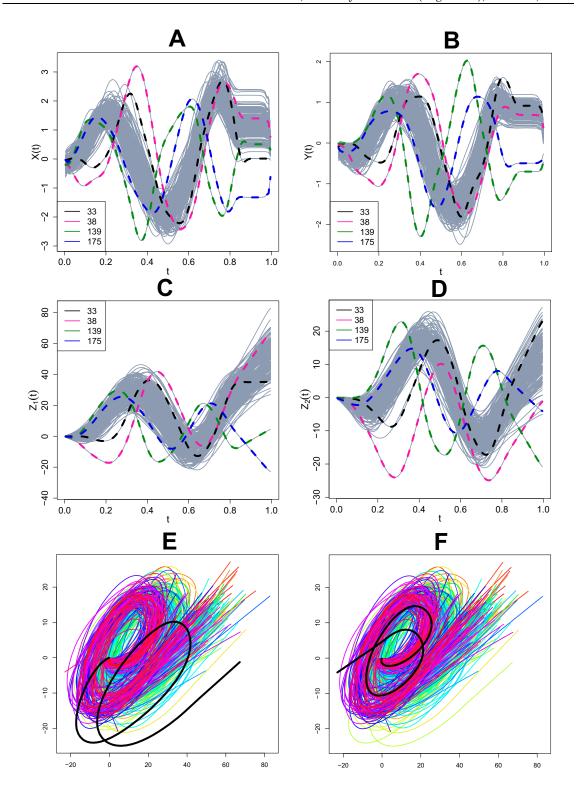


Fig. 10. Datos de letra "e". A y B: Velocidades X(t) e Y(t) en los ejes horizontal y vertical, respectivamente. C y D: Posición de la lapicera los ejes horizontal, Z₁(t), y vertical, Z₂(t), respectivamente. E y F: Letras dibujadas por el lápiz, se resaltan en negro las trayectorias 38 y 175, respectivamente. Basado sobre datos de Bache y Lichman (2013).

Un ejemplo de dato atípico aislado puede verse en rojo la Fig. 9A donde se grafica el precio horario de la electricidad en Alemania entre el 1 de Enero de 2006 y el 30 de Septiembre de 2008. Estos datos fueron utilizados por Liebl (2013) y pueden encontrarse en el material suplementario de dicho trabajo. Se observan en dicho conjunto dos trayectorias también atípicas realzadas en azul y azul claro que corresponden al 25 y 27 de Julio de 2006. La trayectoria destacada en rojo representa los precios de electricidad el día 7 de Noviembre de 2006. Su comportamiento atípico aislado podría deberse a una acumulación de consumo debido al apagón ocurrido el sábado 4 de Noviembre en muchos de los países de la Unión Europea, incluída Alemania. El efecto de datos anómalos aislados puede dismuirse mediante un M-estimador local como el descripto en la Sección 2.

Un ejemplo de dato anómalo de nivel es fácilmente identificable en la Fig. 9B que muestra la altura de 54 niñas medidas sobre un conjunto de 31 edades (de 1 a 18 años) en el estudio Berkeley Growth Study. Los datos pueden encontrarse en la librería fda de R. Por otra parte, un ejemplo de atipicidad en amplitud es el mostrado en Fig. 9C, donde la forma es parecida a las demás pero en otra escala en su parte central y un *outlier* de forma se ilustra en la Fig. 9D. Esos datos fueron extraídos de de Bache y Lichman (2013) y corresponden a la posición de la punta de una lapicera sobre una tableta WACOM cuando un participante del experimento escribe distintas letras, en este caso, la letra e. Este conjunto de datos fue estudiado por Hubert et al. (2016) para ilustrar el buen desempeño del procedimiento de clasificación basado en profundidades que estos autores proponen.

La Fig. 10 muestra los 186 elementos de la muestra que corresponden a la velocidad en ambos ejes al escribir la letra "e", así como el movimiento en ambos ejes de la lapicera. Se destacan, con líneas cortadas de color negro, magenta, verde y azul las observaciones 33, 38, 139 y 175, respectivamente, ya que tienen un comportamiento diferente del resto y se eligieron dos de ellas para mostrar el diseño de la letra dibujada.

Como se menciona en Galeano y Peña (2019) el uso de gráficos obtenidos mediante una reducción de dimensión es de gran ayuda para verificar la homogeneidad de datos y detectar datos atípicos. Una manera de reducir la dimensión es mediante el uso de direcciones aleatorias, ver Cuevas et al. (2007). Otra forma de reducción de dimensión es el análisis de componentes principales funcionales que debe realizarse mediante una método robusto para evitar el enmascaramiento ya descripto, en el caso de observaciones en \mathbb{R}^p , por Pison et al. (2000). Diversas propuestas se han dado para estimar las direcciones principales funcionales en forma robusta. Cada una de ellas, se basa en dar un enfoque robusto a las propiedades que caracterizan a las componentes principales funcionales.

Probablemente la primer propuesta de estimadores robustos de las componentes principales funcionales corresponde al trabajo de Locantore et al. (1999) quienes propusieron las llamadas componentes principales esféricas, estudiadas posteriormente en Gervini (2008) y Boente et al. (2019). La idea subyacente de este procedimiento es controlar la influencia de los

posibles datos anómalos dividiendo a las observaciones centradas por su norma. Una propiedad atractiva de este procedimiento es que en el caso en que existan momentos de orden 2, los estimadores de las direcciones principales tienen el mismo límite (en casi todo punto) que los estimadores clásicos, una propiedad conocida como consistencia en el sentido de Fisher.

Hyndman y Ullah (2007) consideraron un enfoque diferente que se basa en el hecho que, en el caso clásico, la primer dirección principal maximiza, sobre la esfera unidad, la varianza de la proyección de X en la dirección α . Estos autores propusieron un procedimiento robusto basado en utilizar un estimador robusto de dispersión, en lugar de la varianza muestral, aplicado a la proyección de las trayectorias observadas y suavizadas. Bali et al. (2011) generalizaron este enfoque combinandolo con una penalización y proyecciones en bases de dimensión creciente de modo a obtener direcciones suaves. Este tipo de procedimientos, que se basan en la noción de encontrar proyecciones interesantes maximizando una cierta función objetivo o índice de proyección, suelen denominarse métodos de *projection-pursuit* y fueron discutidos, en el caso finito-dimensional, por Huber (2010) quien hace una amplia revisión de los mismos.

Finalmente, otra aproximación al problema consiste en definir directamente estimadores robustos de los espacios vectoriales generados por las primeras p direcciones principales, minimizando, por ejemplo, una medida robusta de la distancia entre las observaciones y sus proyecciones ortogonales sobre espacios de dimensión p. Esta aproximación fue utilizada por Lee et al. (2013), Boente y Salibian-Barrera (2015) y Cevallos-Valdiviezo (2016) para dar distintas propuestas robustas.

Como mencionamos anteriormente, procedimientos como el de componentes principales resultan útiles para identificar los datos atípicos mediante el boxplot de los escores o de la norma al cuadrado de los residuos del ajuste $\hat{r}_i(t) = X_i(t) - \hat{X}_i(t) \cot \hat{X}_i(t) = \hat{\mu}(t) + \sum_{\ell=1}^p \hat{\zeta}_{i,\ell} \ \hat{\varphi}_\ell(t)$ la predicción de las trayectorias, donde indicamos por $\hat{\varphi}_\ell$, $1 \le \ell \le p$ a los estimadores robustos de las p primeras direcciones principales y por $\hat{\zeta}_{i,\ell}$, $1 \le i \le n$, $1 \le \ell \le p$ a los escores asociados.

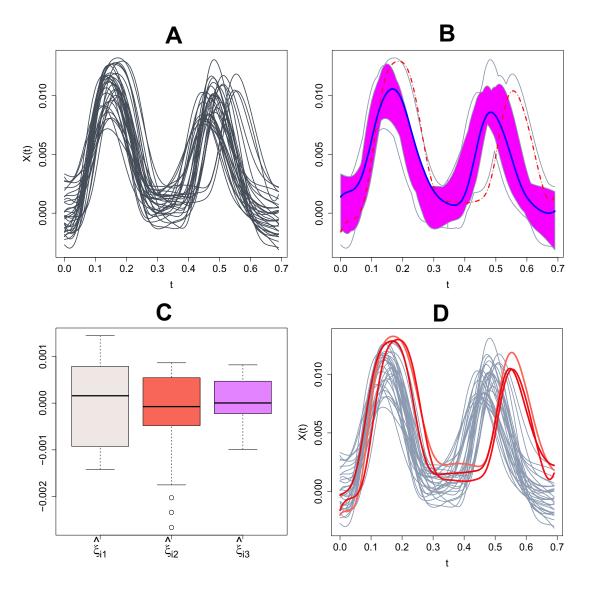


Fig. 11. Datos de movimiento del labio. A: Gráfico de las trayectorias X(t). B: Boxplot funcional. C: En rosa, rojo y violeta se presentan los boxplot de los escores correspondientes a la primera, segunda y tercera dirección principal, respectivamente. D: Movimiento del labio con trayectorias identificadas como atípicas por el boxplot en tonos de rojo. Basado sobre datos de Gervini (2008).

A modo de ejemplo, consideremos los datos de la Fig. 11A que corresponden al movimiento del centro del labio inferior al pronunciar la palabra bob en la frase Say bob again y que fueron utilizados en Gervini (2008). El movimiento del labio X(t) se registra 32 veces en 501 instantes en el intervalo [0,0.69]. La Fig. 11B muestra el boxplot funcional que permite identificar una trayectoria como anómala. Sin embargo, del gráfico 11D se identifican otras dos trayectorias con el mismo patrón inusual. Para estas tres curvas la recuperación del labio al terminar la letra o es más tardía. En este caso, se utilizó la propuesta dada Bali et al. (2011) para estimar las direcciones principales y sus escores, logrando identificar las tres trayectorias con retardo en la recuperación del labio inferior mediante los escores

asociados a la segunda dirección principal cuyo boxplot se presenta en rojo en la Fig. 11C. Dichas trayectorias corresponden a las observaciones 24, 25 y 27.

En vista de estos ejemplos, es claro que es necesario desarrollar procedimientos robustos para resumir y analizar conjuntos de datos funcionales. Entre las técnicas de reducción de dimensión además del análisis de componentes principales funcional descripto más arriba, se encuentran: el análisis de componentes principales comunes funcional cuando tratamos con varias poblaciones y el análisis de correlación canónica funcional que puede utilizarse, por ejemplo, en el caso de la tableta WACOM para encontrar estimadores de las direcciones que maximizan la asociación entre las proyecciones de las velocidades del movimiento del lápiz en el eje horizontal y vertical. Estos problemas han sido abordados por Bali y Boente (2017) y por Alvarez et al. (2019) y Boente y Kudraszow (2020), respectivamente.

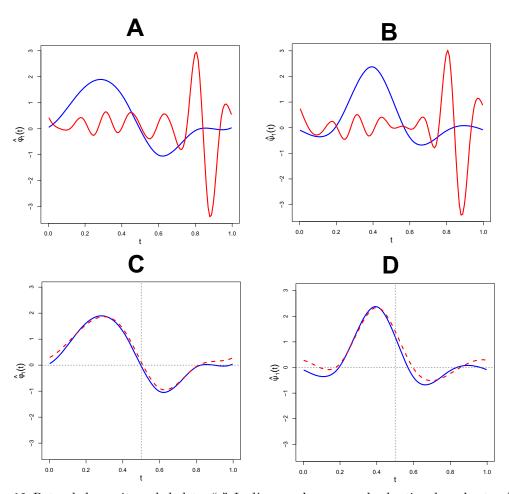


Fig. 12. Datos de la escritura de la letra "e". La línea azul corresponde al estimador robusto y la roja al clásico. A y B: Estimaciones $\hat{\Phi_1}$ y $\hat{\Psi_1}$ de las direcciones canónicas asociadas a X e Y, respectivamente, obtenidas usando todas las observaciones. C y D: Estimaciones de las direcciones canónicas asociadas a X e Y, respectivamente donde en línea cortada se indica la estimación clásica obtenida cuando se eliminan de la muestra las trayectorias detectadas como anómalas. Basado sobre datos de Bache y Lichman (2013).

Para ilustrar el efecto devastador de los datos anómalos consideremos el ejemplo de la letra "e". Las trayectorias correspondientes a la velocidad del lápiz en el eje horizontal (X) y vertical (Y) se muestran en la Fig. 10 con las trayectorias atípicas detectadas en color. En la Fig. 12 se presentan en rojo las estimaciones obtenidas mediante el procedimiento clásico descripto en He et al. (2004) y Ramsay y Silverman (2005). Indicamos por $\hat{\Phi}_1$ y $\hat{\Psi}_1$ a los estimadores de las primeras direcciones canónicas asociadas a X e Y, respectivamente. El panel superior corresponde a las estimaciones obtenidas usando todas las trayectorias. La línea azul corresponde a la estimación obtenida mediante el procedimiento robusto propuesto por Alvarez et al. (2019) utilizando el coeficiente de correlación de Spearman. En el panel inferior se muestra en línea cortada el estimador clásico obtenido cuando se eliminan de la muestra las trayectorias detectadas como anómalas.

Como puede verse en el gráfico, al eliminar las observaciones detectadas como atípicas la estimación clásica da resultados similares a los de la robusta calculada con todos los datos. Por otra parte, las estimaciones robustas permiten visualizar a las direcciones canónicas como un contraste en el rango [0,0.8] con menor peso para valores de tiempo superiores a 0.5 y son casi nulas luego de 0.8, lo que se explica por el hecho que tanto la velocidad en el eje horizontal como en el vertical son casi constantes después de ese instante de tiempo (ver Fig. 10).

El problema de regresión funcional generaliza el problema de regresión lineal muy estudiado en el caso de variables explicativas reales, a la situación en que las covariables son funciones. En este caso, los datos atípicos en las covariables funcionales con alta palanca tienen un efecto aún más devastador que en el caso real. Propuestas robustas para controlar el efecto de datos anómalos han sido dadas por Maronna y Yohai (2013) y por Kalogridis y Van Aelst (2019), mientras que el problema de selección de variables en presencia de varias covariables funcionales fue considerado por Pannu y Billor (2015). Una extensión de este modelo al caso parcialmente lineal en el que además de las covariables funcionales que entran al modelo en forma lineal, existen variables predictoras reales que predicen la respuesta en forma noparamétrica fue considerada por Huang et al. (2015), Qingguo (2015) y Boente et al. (2020).

Finalmente, a continuación presentaremos una situación más desafiante en el análisis de datos funcionales que corresponde al caso en que las trayectorias son esparsas, es decir, para cada individuo los datos se observan en una grilla de tiempo $\{t_{ij}\}_{1\leq j\leq n_i}$ donde n_i es pequeño y además pueden estar sujetos a errores de medición, o sea, observamos

$$X_{ij} = X_i(t_{ij}) + \varepsilon_{ij}$$
,

donde ε_{ij} son independientes de los tiempos t_{ij} que pueden ser aleatorios y en el caso en que haya momentos, se supone que $\mathbb{E}\varepsilon_{ij} = 0$. En general, este tipo

de situaciones ocurre en estudios longitudinales donde los sujetos se miden en distintos tiempos y el número de observaciones n_i es usualmente acotado. El análisis de este tipo de datos funcionales requiere más esfuerzo metodológico que el de los observados densamente. Usualmente a pesar de que cada individuo se observa en pocos puntos, el conjunto $\{t_{ij}\}_{1\leq j\leq n_i, 1\leq i\leq N}$ es un conjunto de puntos que cubre adecuadamente el intervalo $\mathcal I$ dominio de X. Este tipo de datos sigue un paradigma distinto ya que sólo permiten obtener tasa noparamétricas al estimar la media y operador de covarianza y ese problema es heredado por las propuestas robustas.

La Fig. 13A muestra un ejemplo de datos esparsos que corresponde a datos de CD4, que es parte del Multicentre AIDS Cohort Study (Zeger y Diggle, 1994). Los datos corresponden a 2376 mediciones de recuentos de células CD4, tomadas en 369 hombres. Los tiempos se miden en años desde la seroconversión (t=0). Todo el conjunto de datos está disponible en paquete catdata de R. Para asegurarse de que haya suficientes observaciones para estimar el función de covarianza en cada par de puntos (s, t), nos centramos en el observaciones con $t \ge 0$, y en individuos con más de una medición, obteniéndose N = 292 curvas, con el número de observaciones por individuo que oscilan entre 2 y 11 (con una mediana de 5), como se observa en la Fig. 13A. Existen pocas propuestas para el análisis de componentes principales funcional para este tipo de datos. Un enfoque de estimación basado en splines fue dado por James et al. (2000) y propuestas robustas siguiendo este mismo punto de vista fueron consideradas por Gervini (2009) y Maronna (2019). Por otra parte, Yao et al. (2005) utilizan una aproximación que consiste en estimar la función de covarianza $\gamma(s,t) = \text{Cov}(X(s),X(t))$ utilizando los productos cruzados de las observaciones existentes y un suavizado bivariado basado en núcleos. En particular, estos datos fueron analizados por Yao et al. (2005) y la superficie de la Fig. 13B corresponde a la estimación de la función de covarianza obtenida utilizando su propuesta.

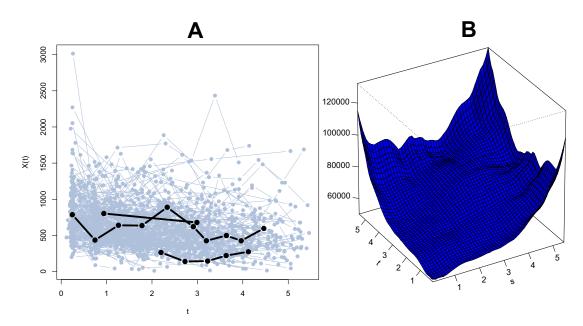


Fig. 13. A: Conteos de CD4 para N=292 pacientes después de la seroconversión ($t \ge 0$). Se resaltan tres trayectorias elegidas al azar con líneas negras. B: Superficie correspondiente a la estimación de la función de covarianza $\gamma(s,t)=\text{Cov}(X(s),X(t))$. Basado sobre datos del Multicentre AIDS Cohort Study (Zeger y Diggle, 1994).

En el contexto de datos esparsos quedan aún muchos problemas abiertos para los cuales alternativas robustas son necesarias como, por ejemplo, el de correlación canónica funcional o regresión funcional. Referimos al trabajo de Wang et al. (2016) para una discusión sobre este tema en el caso clásico, así como en el importante problema de test de hipótesis para la media y operadores de covarianza. En el caso de datos densos, bandas para el parámetro de posición fueron estudiadas por Lima et al. (2019a) y b).

4. Conclusiones

Esta nueva era donde los desarrollos computacionales generan datos cada vez más complejos, necesita de procedimientos estadísticos nuevos adaptados y diseñados para analizar la complejidad de los datos obtenidos. En este sentido, hay un gran campo en el que la Estadística y en particular, la rama de la Inferencia robusta, tienen que desempeñar un rol destacado. Es fundamental la propuesta de métodos robustos en el contexto del análisis de datos funcionales para obtener estimaciones confiables que permitan además detectar las observaciones atípicas ya que dichas trayectorias anómalas son, en muchos casos, difíciles de identificar a simple vista. El desarrollo de este tipo de procedimientos requieren una eficiente implementación numérica

para que los mismos puedan ser utilizados por la comunidad interesada así como el estudio teórico de sus propiedades que garantice que las propuestas resultan efectivamente consistentes a la cantidad de interés. Estos interesantes problemas seguramente darán lugar en el futuro a innovadores desarrollos con grandes posibilidades de aplicación en diversas ramas de la ciencia.

Agradecimientos

La autora quiere agradecer a los miembros de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales por considerarla merecedora de formar parte de dicha institución y por la invitación a publicar este artículo. Los resultados de este trabajo fueron financiados parcialmente por los proyectos PICT 2018-00740 de ANPCYT, 20020170100022BA de la Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina y por el proyecto MTM2016-76969P del Ministerio de Economía y Competitividad de España (MINECO/AEI/FEDER, UE).

Referencias

- Achenwall G (1749) Abrißder neuesten Staatswissenschaft der vornehmsten Europïschen Reiche und Republiken, Göttingen (Alemania).
- Agostinelli C, Bianco A, Boente G (2020). Robust estimation in single index models when the errors have a unimodal density. Annals of the Institute of Mathematical Statistics, 72:855-893.
- Alvarez A, Boente G, Kudraszow N (2019). Robust sieve estimators for functional canonical correlation analysis. Journal of Multivariate Analysis, 170:46-62.
- Bali L, Boente G (2017) Robust estimators under a functional common principal components model. Computational Statistics and Data Analysis, 113:424-440.
- Bali L, Boente G, Tyler D, Wang J-L (2011) Robust functional principal components: a projection-pursuit approach. Annals of Statistics, 39:2852-2882.
- Bianco A, Boente G (2004) Robust estimators in semiparametric partly linear regression models. Journal of Statistical Planning and Inference, 122:229-252.
- Bianco A, Boente G, González-Manteiga W, Pérez-González A (2011) Asymptotic behavior of robust estimators in partially linear models with missing responses: The effect of estimating the missing probability on the simplified marginal estimators. TEST, 20:524-548.
- Bianco A, Spano P (2019) Robust inference for nonlinear regression models. TEST, 28:369-398.
- Bickel PJ, Breiman L, Brillinger D, Brunk H, Pierce D, Chernoff H, Cover Th, Cox DR, Eddy W, Hampel F, Olshen R, Parzen E, Rosenblatt M, Sacks J, Wahba G (1977). Discussion: Consistent nonparametric regression. Annals of Statistics, 5:620-640.
- Boente G, Fraiman R (1989a) Robust nonparametric regression estimation. Journal of Multivariate Analysis, 29:180-198.
- Boente G, Fraiman R (1989b) Robust nonparametric regression estimation for dependent observations. Annals of Statistics, 17:1242-1256.
- Boente G, Fraiman R (1990) Asymptotic distribution of robust estimates for nonparametric models from mixing observations. Annals of Statistics, 18:891-906.
- Boente G, González-Manteiga W, Pérez-González A (2009) Robust nonparametric estimation with missing data. Journal of Statistical Planning and Inference, 139:571-592.
- Boente G, He X, Zhou J (2006) Robust estimates in generalized partially linear models. Annals of Statistics, 34:2856-2878.
- Boente G, Kudraszow N (2020) Robust smoothed canonical correlation analysis for functional data. Statistica Sinica, DOI: 10.5705/ss.202020.0084.

- Boente G, Martínez A, Salibian–Barrera M (2017) Robust estimators for additive models using backfitting. Journal of Nonparametric Statistics, 29:744-767.
- Boente G, Martínez A (2017) Marginal integration M-estimators for additive models. TEST, 26:231-260.
- Boente G, Rodríguez D (2010) Robust inference in generalized partially linear models. Computational Statistics and Data Analysis, 54:2942-2966.
- Boente G, Rodríguez D (2012) Robust estimates in generalized partially linear single-index models. TEST, 21:386-411.
- Boente G, Rodríguez D, Sued M (2019) The spatial sign covariance operator: Asymptotic results and applications. Journal of Multivariate Analysis, 170:115-128.
- Boente G, Salibián-Barrera M (2015) S-estimators for functional principal component analysis. Journal of the American Statistical Association, 110:1100-1111.
- Boente G, Salibián Barrera M, Vena P (2020) Robust estimation for semi-functional linear regression models. En prensa en Computational Statistics and Data Analysis, 152:107041.
- Box GEP (1953) Non-normality and tests on variance. Biometrika, 40:318-335.
- Bravo F (2019) Robust estimation and inference for general varying coefficient models with missing observations. TEST, DOI: 10.1007/s11749-019-00692-0.
- Buja A, Hastie T, Tibshirani R (1989) Linear smoothers and additive models (with discussion). Annals of Statistics, 17:453-555.
- Cevallos-Valdiviezo H (2016) On methods for prediction based on complex data with missing values and robust principal component analysis. Tesis de Doctorado, Universidad de Ghent (Bélgica), pp. 1-157.
- Chambers JM, Cleveland WS, Kleiner B, Tukey PA (1983) Graphical Methods for Data Analysis. CRC Press, Boca Raton (USA), pp. 1-395.
- Cleveland W (1985) The elements of graphing data. Wadsworth, Monterey (USA), pp. 1-323.
- Cox DD (1983). Asymptotics for M-type smoothing splines. Annals of Statistics, 11:530-551.
- Cuevas A, Febrero M, Fraiman R (2007) Robust estimation and classification for functional data via projection-based depth notions. Computational Statistics, 22:481-496.
- Cunningham JK, Eubank RL, Hsing T (1991) M-type smoothing splines with auxiliary scale estimation. Computational Statistics and Data Analysis, 11:43-51.
- Ferraty F, Vieu P (2006) Nonparametric Functional data analysis: Theory and Practice. Springer, New York (USA), pp.1-258.
- Galeano P, Peña D (2019) Data science, big data and statistics. TEST, 28:289-329.
- Gervini D (2008) Robust functional estimation using the median and spherical principal components. Biometrika, 95:587-600.
- Gervini D (2009). Detecting and handling outlying trajectories in irregularly sampled functional datasets. Annals of Applied Statististics, 3:1758-1775.
- Hampel FR (1968) Contributions to the theory of robust estimation, PhD Thesis, Dept. Statistics, Univ. California, Berkeley (USA), pp. 1-206.
- Hampel F (1971) A general qualitative definition of robustness. Annals of Mathematical Statistics, 42:1887-1896.
- Hampel F (1974) The influence curve and its role in robust estimation. Journal of the American Statistical Association, 69:383-393.
- Härdle W (1990) Applied nonparametric regression. Cambridge University Press, New York (USA), pp. 1-333
- Härdle W, Müller M, Sperlich S, Werwatz A (2004) Nonparametric and Semiparametric Models. Springer, New York (USA), pp. 1-299.
- Härdle W, Tsybakov AB (1988) Robust nonparametric regression with simultaneous scale curve estimation. Annals of Statistics, 16:120-135.
- Hastie T, Tibshirani RJ (1990) Generalized Additive Models. Monographs on Statistics and Applied Probability No. 43. Chapman and Hall, London (UK), pp.1-335.
- He G, Müller HG, Wang JL (2004) Methods of canonical analysis for functional data. Journal of Statistical Planning and Inference, 122:141-159.
- He X, Shi P (1996) Bivariate tensor–product B–spline in a partly linear model. Journal of Multivariate Analysis, 58:162-181.
- He X, Zhue ZY, Fung WK (2002) Estimation in a semiparametric model for longitudinal data with unspecified dependence structure. Biometrika, 89:579-590.
- Heritier S, Cantoni E, Copt S, Victoria-Feser M-P (2009) Robust Methods in Biostatistics. Wiley, Chichester (UK), pp. 1-268.
- Horowitz J (2009) Semiparametric and Nonparametric Methods in Econometrics. Springer, New York (USA), pp. 1-271.
- Horváth L, Kokoszka, P (2012). Inference for functional data with applications. Springer, New York (USA), pp. 1-422

- Huang L , Wang H, Cui, H, Wang S (2015). Sieve M-estimator for a semi-functional linear model. Science China, Mathematics, 58: 2421-2434.
- Huber P (1964) Robust estimation of a location parameter. Annals of Mathematical Statistics, 35:73-101.
- Huber P (1967) The behavior of maximum likelihood estimates under nonstandard conditions. En: Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics, pp. 221–233, University of California Press, Berkeley (USA).
- Huber P (1968) Robust confidence limits. Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und Verwandte Gebiete, 10:269-278.
- Huber PJ (1979) Robust smoothing. En: Launer LR, Wilkinson GN (eds.) Robustness in Statistics, Academic Press, New York (USA), pp. 33-47.
- Huber P (1985) Projection pursuit. Annals of Statistics, 13:435-475.
- Huber P (2010). Data Analysis: What can be learned from the past 50 years, Wiley, New York (USA), pp. 1-235.
- Huber, P, Ronchetti, E. (2009). Robust Statistics. Wiley, New York (USA), pp.1-363.
- Hubert M, Rousseeuw PJ, Segaert P (2015) Multivariate functional outlier detection. Statistical Methods, Applications, 24:177-202.
- Hyndman RJ, Ullah S (2007) Robust forecasting of mortality and fertility rates: A functional data approach. Computational Statistics and Data Analysis, 51:4942-4956.
- James G, Hastie T, Sugar C (2000) Principal component models for sparse functional data. Biometrika, 87:587-602.
- Kalogridis I, Van Aelst S (2019) Robust functional regression based on principal components. Journal of Multivariate Analysis, 173:393-415.
- Kalogridis I, Van Aelst S (2021) M-type penalized splines with auxiliary scale estimation. Journal of Statistical Planning and Inference, 212:97-113.
- Kalogridis I (2020). Asymptotics for M-type smoothing splines with non-smooth objective functions. https://arxiv.org/pdf/2002.04898.pdf.
- Lee S, Shin H, Billor N (2013) M-type smoothing spline estimators for principal functions. Computational Statistics and Data Analysis, 66:89-100.
- Liebl D (2013) Modelling and forecasting electricity spot prices: a functional data perspective. The Annals of Applied Statistics, 7:1562-1592.
- Lima IR, Cao G, Billor N (2019a) Robust simultaneous inference for the mean function of functional data. TEST, 28:785-803.
- Lima IR, Cao G, Billor N (2019b) M-Based simultaneous inference for the mean function of functional data. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 71:577-598.
- Linton O, Nielsen J (1995) A kernel method of estimating structured nonparametric regression based on marginal integration. Biometrika, 82:93-101.
- Locantore N, Marron J, Simpson D, Tripoli N, Zhang J, Cohen K (1999) Robust principal components for functional data. TEST, 8:1-28.
- López-Pintado S, Romo J (2009) On the concept of depth for functional data. Journal of the American Statistical Association, 104:718-734.
- Maronna R (2019) Robust functional principal components for irregularly spaced longitudinal data. Statistical Papers. DOI: 10.1007/s00362-019-01147-2
- Maronna M, Yohai V. (2013) Robust functional linear regression based on splines. Computational Statistics and Data Analysis, 65:46-55.
- Maronna R, Martin R, Yohai V, Salibián-Barrera M (2019) Robust Statistics: Theory and Methods (with R). Wiley, New York (USA), pp.1-430.
- McGill R, Tukey JW, Larsen W (1978) Variations of Box Plots. The American Statistician, 32:12-16.
- Nadaraya EA (1964) On estimating regression. Theory Probability and Applications, 9:141-142.
- Nieto-Reyes A, Battey H (2016) A topologically valid definition of depth for functional data. Statistical Science, 31:61-79.
- Pannu J, Billor N (2015) Robust group-Lasso for functional regression model. Communications in Statistics Simulation and Computation. 46:3356-3374
- Pison G, Rousseeuw PJ, Filzmoser P, Croux C (2000) A robust version of principal factor analysis. En: Bethlehem J, van der Heijden P (eds.), Proceedings in Computational Statistics. Physica–Verlag, Heidelberg (Alemania), pp. 385-90.
- Qingguo T (2015). Estimation for semi-functional linear regression. Statistics, 49; 1262-1278.
- Ramsay JO, Silverman BW (2005). Functional Data Analysis. Springer, New York (USA), pp. 1-426.
- Severance-Lossin E, Sperlich S (1999) Estimation of derivatives for additive separable models, Statistics, 33:241-265.
- Sinclair J. (ed.) (1791-1799) The statistical account of Scotland. Edinburgh (UK), 21 vols.

- Stone C (1977) Consistent nonparametric regression. Annals of Statistics, 5:595-645.
- Stone C (1982) Optimal global rates of convergence for nonparametric regression. Annals of Statistics, 10:1040-1053.
- Stone C (1985) Additive regression and other nonparametric models. Annals of Statistics, 13:689-705. Sun Y, Genton MG (2011) Functional boxplots. Journal of Computational and Graphical Statistics, 20:316-334.
- Tukey JW (1960) A survey of sampling from contaminated distributions. En: Olkin I, Ghurye, S, Hoefding W, Madow W, Mann, H. (eds.), Contributions to probability and statistics: Essays in honor of Harold Hotelling. Stanford University Press, Stanford (USA), pp. 448-485.
- Tukey JW (1970) Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley, Massachussets (USA), pp. 1-711.
- van der Zande J (2010) Statistik and history in the German enlightenment. Journal of the History of Ideas, 71:411-432.
- Wang JL, Chiou J, Müller HG (2016) Functional Data Analysis. Annual Review of Statistics and its Application, 3:257-295.
- Watson GS (1964) Smooth regression analysis. Sankhya A, The Indian Journal of Statistics, 26:359-372.
- Yao F, Müller HG, Wang JL (2005) Functional data analysis for sparse longitudinal data. Journal of the American Statistical Association, 100:577-590.
- Yohai VJ (1987) High breakdown-point and high efficiency robust estimates for regression. Annals of Statistics, 15:642-656.
- Zeger SL, Diggle PJ (1994) Semiparametric models for longitudinal data with application to CD4 cell numbers in HIV seroconverters. Biometrics, 50:689-699.



Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Argentina

Tomo 72, 2021

INVASION BIOLOGY: EVIDENCE, ASSUMPTIONS, AND CONSERVATIONISM

Nancy M. Correa¹, Radu C. Guia u², Demetrio Boltovskov^{3*}

¹Servicio de Hidrografía Naval y Escuela de Ciencias del Mar, Sede Educativa Universitaria, Facultad de la Armada, UNDEF, Av. Montes de Oca 2124, 1271 Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

² Biology Program, Glendon College, York University, 2275 Bayview Avenue, Toronto, ON M4N 3M6, Canada

³IEGEBA, Instituto de Ecología, Genética y Evolución, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad de Buenos Aires, Intendente Güiraldes 2160, Pabellón 2, Ciudad Universitaria, 1428 Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. *Corresponding author: boltovskoy@gmail.com

Keywords

Introduced species Invasive species Impact Geographic origin Eradication Control

Abstract Although isolated records of nonindigenous species (i.e., species transported with the aid of human activities outside of their native geographic ranges) have been known for centuries, the first comprehensive work on these organisms and their impacts is the book by Charles Elton published in 1958. The rate of species introductions increased significantly since the middle XIX century, with recent estimates suggesting around 600 plant and animal species per year. Many of these introductions have been deliberate (crops and ornamental plants, domesticated and wild animals), but most were accidental, usually in association with the intra- and intercontinental transport, chiefly by sea, of people and merchandise. Some of these species have been very successful in colonizing the new habitats and became invasive, displacing native species and affecting resident communities and human interests. As a consequence of these high-profile invasions, in the last 30 years or so a new ecological discipline flourished -"Invasion Biology". Among its goals are attempts at establishing hypotheses or general rules aimed at explaining how and why some introduced species are so successful in the areas they colonized. However, empirical support for these hypotheses has been very uneven: each explains some cases, but fails to account for many others. Invasion Biology is presently moving on thin ice, unable to reach consensus on such elementary notions as differences between native, introduced, and invasive. Idiosyncratic conservation-related issues, as well as legitimate and personal interest-driven academic and social factors led to

the demonization of introduced species engendering a deep crevice in the field. A majority of the scholars in this young field adhered to the concept that geographic origin is of utmost importance: all introduced species are undesirable, and therefore guilty of negative impacts until proven innocent. In contrast, other researchers consider that geographic origin is of minor importance; like many indigenous species, most introduced organisms have negative impacts on some natives, positive on others, and mostly neutral impacts overall. The pristine state of ecosystems, free from introduced species, is a subjective human concept strongly influenced by emotional, ideological and cultural values fostered by conservationists. Both introduced and native species can have undesirable impacts on ecosystems and on human interests, and these impacts depend on multiple factors, especially the species concerned, but also many other conditions associated with functional roles, time, and space. When the overall impacts are clearly negative, both native and introduced species may require human intervention in the form of control or eradication actions, regardless of their geographic origin.

Palabras clave
Especies
introducidas
Especies
invasoras
Impacto
Origen
geográfico
Erradicación

Resumen La biología de las invasiones: evidencias, supuestos y conservacionismo. Si bien se conocen menciones de especies introducidas (insertadas por actividades humanas en sitios distantes de su área nativa) desde hace siglos, el primer tratado exhaustivo dedicado a estos organismos y sus impactos es el libro de Charles Elton publicado en 1958. El ritmo de crecimiento de estas introducciones se aceleró notablemente desde mediados del siglo XIX, y se estima que actualmente es de alrededor de 600 plantas y animales por año. Muchas de las introducciones han sido voluntarias (plantas cultivadas para sustento u ornamentales, animales domesticados y silvestres), pero la mayoría fueron accidentales, generalmente en asociación con el transporte intra- o intercontinental, principalmente marítimo, de personas y mercaderías. Algunos de estos organismos han sido muy exitosos en su colonización del nuevo ambiente, transformándose en invasores, desplazando a especies nativas y afectando hábitats e intereses humanos. Como consecuencia de estas invasiones espectaculares, en los últimos 30 años se afianzó una rama particular de la ecología, la "Biología de las Invasiones". Uno de sus propósitos fue el intento de establecer hipótesis o reglas generales para explicar cómo y porqué las especies introducidas suelen ser tan exitosas en los ambientes invadidos. Sin embargo, el apoyo a estas hipótesis por parte de estudios puntuales fue muy heterogéneo: cada una de ellas da cuenta de algunos casos, pero es rechazada en muchos otros. La Biología de las Invasiones se encuentra actualmente en terreno pantanoso, sin lograr consensos sobre aspectos tan básicos como la diferenciación entre especie nativa, vs. introducida vs. invasora. Cuestiones idiosincráticas relacionadas con el conservacionismo e intereses académicos y sociales (genuinos o no) contribuyeron a demonizar a las especies introducidas generando una división de criterios en la especialidad. Una fracción mayoritaria de los especialistas adhirieron al postulado que el origen es un factor determinante, todas las especies introducidas son indeseables y por lo tanto representan un riesgo hasta que se demuestre lo contrario. La otra fracción considera que el origen no es el factor definitorio del rol e impacto de las especies; al igual que las nativas, la gran mayoría de las introducidas tienen impactos negativos sobre algunos integrantes de las comunidades, positivos sobre otros, y mayormente neutros. El estado prístino de los ecosistemas, libres de especies introducidas, es una concepción humana subjetiva y con una fuerte carga emocional, ideológica y cultural que representa la base de la corriente conservacionista. Tanto especies introducidas como nativas pueden tener impactos indeseables sobre los ecosistemas y los intereses humanos, y estos impactos dependen de un sinnúmero de factores que varían en función de los organismos involucrados, el tiempo, y el espacio. Cuando los impactos son claramente negativos, ambas pueden requerir acciones de control o erradicación, independientemente de su origen.

1. Introduction

Each of the plant and animal species described on Planet Earth (around 1.5 million, although actual numbers are likely much higher, with some estimates reaching approximately 10 million; Mora et al. 2011) has a unique geographic origin. By definition, the same species could not have originated in two or more different locations. Each of these species is not a static entity, as it changes in time and space. Initially, its population normally expands its distribution, but eventually the range can shrink, move elsewhere, or disappear altogether. If **the same** species inhabits sites A and B, either contiguous or spatially separated, its origin may have been in one of them, and its presence at the other may be the result of the expansion of its geographic range (Fig. 1). In other words, the species can only first evolve in

one particular location, although that location may not be easy to determine. It is also possible that the species may have originated somewhere else, and then it may have expanded its range to another site, before becoming extinct in the initial site where it had originated. This is what often makes it hard to determine where species may have originated.

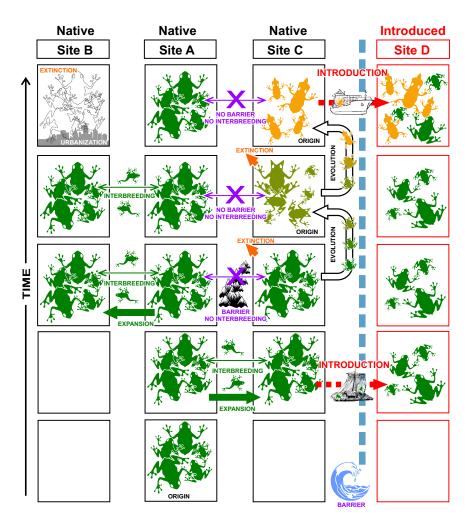


Fig. 1. Simplified scheme of the origin, dispersal, evolution, and introduction of a biological species.

Origination of new species can respond to numerous mechanisms, but the most common is geographic isolation which involves allopatric speciation (although sympatric speciation is also probably common: Dieckmann and Doebeli, 1999), which involves the emergence of a barrier (for example, a mountain chain) that splits a population (i.e., a group of individuals of the same species inhabiting the same area) so that members of the two subpopulations cannot come in contact and reproduce with those of the other. Over time (thousands to millions of years) both sub-populations evolve separately, and eventually even if the barrier disappears, they become unable to interbreed (Fig. 1).

During the geological history of our planet, major changes in the areas occupied by different species occurred many times. Range expansions were achieved using their own dispersal capabilities (flying, swimming, walking), through the action of natural phenomena (the wind that carries plant spores and seeds, river and ocean currents), or taking advantage of the dispersal capabilities of organisms they interacted with (for example, parasites, or seeds dispersed with the feces of animals that feed on them, plant seeds and small invertebrates which travel on the muddy feet of birds, etc.). On the other hand, changes in the geography and climate of the Earth (creation/disappearance or movements of continents and islands, sea-level changes, glaciations, orogenic and volcanic events, etc.) changed pre-existing boundaries and geographic connections (such as land bridges or links between oceans and seas) precluding or facilitating the dispersal of species (Stigall 2019), and engendering massive extinctions and compositional turnovers of plant and animal species (Barnosky et al. 2011).

In prehistoric times, humans contributed to these displacements by carrying around plants and animals used for fulfilling their needs (for instance, cultivated plants, domesticated animals, and wild animals kept as pets), as well as, involuntarily, many other organisms associated with humans and their belongings (parasites, commensals, plant seeds on clothing, pathogens, etc.). Because these human migrations were relatively slow, gradual and perhaps geographically more limited than in modern times, their effects on plant and animal range expansions were also thought to be rather limited. However, the effects of ancient human populations of hunters and gatherers on the distributions and associations of various other species are probably underestimated. For example, there is good evidence that humans played an important role in the extinction of the megafauna (large animals) on several continents – particularly in Australia and the Americas, as well as on the extinction of numerous island species, thousands of years ago, well before the arrival of the first European explorers (Martin 1984; Kirch 2002; Koch and Barnosky 2006; Ponting 2007). At the same time, prehistoric people had a significant impact in modifying environments previously believed to be "pristine", such as the Amazon rainforest (Heckenberger et al. 2008), and were instrumental in changing the species compositions of these environments well before recorded history. Because these events occurred long ago, and were usually not documented, there may be a tendency to overlook, or minimize, the extent of the changes brought by prehistoric human populations to the distributions of various animals and plants around the world. The Polynesians, for example, colonized many islands in the Pacific Ocean, starting about 2,500 years ago, and brought with them several species of plants and animals, including the Polynesian or Pacific rat (Rattus exulans) - a species originally from Southeast Asia, which subsequently became established on some of these islands and contributed to major ecological changes there (Ponting 2007; Pascal 2011).

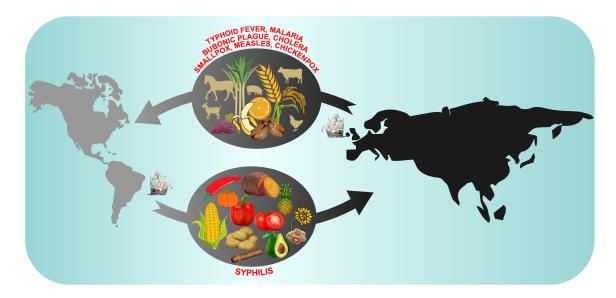


Fig. 2. Exchange of organisms (cultivated plants, domesticated animals, pathogens) between Eurasia and the Americas as a result of the European colonization of the New World.

Toward the XV century, technological advances allowed for larger and more frequent transoceanic voyages, especially between Eurasia and the Americas. With the European colonization of the Americas a large number of plants and animals used by humankind were transported across the ocean and introduced in territories which they could not have reached otherwise (Fig. 2). This process was called the "Columbian Exchange" (Nunn and Qian 2010), affecting both America and Eurasia. Cultivated plants, like potatoes, mandioca, peppers, sweet potatoes, corn, tomatoes, pineapples, natural rubber, tobacco, previously unknown in the Old World, were imported from the Americas. In exchange, from Eurasia colonizers brought to the Americas, a variety of commercially valuable plant species, including, among others, coffee, sugar cane, rice, wheat, barley, apples, citrus, grapes, bananas, and most domesticated animals, including horses, pigs, sheep, goats, chicken, and cattle (Fig. 2). These interchanges had positive effects for human welfare on both continents, but they also involved the exchange of pathogens previously absent on either side. From this perspective, American indigenous peoples suffered the most. European colonizers introduced many infectious diseases in the New World, including smallpox, measles, chickenpox, typhoid fever, malaria, bubonic plague and cholera, all of which decimated Native American populations severely (according to some estimates, up to 80-90% of the Native Americans were killed by these diseases) (Fig. 2). On the other hand, Eurasians received syphilis from the New World, but also the only known remedy for malaria at the time: quinine.

As opposed to species that migrated to new habitats using their own means or other processes unassociated with human activities, those transported by man are known as introduced species (IS). That is, species that with the direct or indirect aid of humans succeeded in bridging otherwise presumably unsurmountable barriers (Fig. 3). It should be mentioned that this rather simple concept does not take into account the many definitions proposed for IS, many of which take other factors into account, such as the distance to the closest native site, or the requirement that in the introduced range the species can survive without human assistance, or the timing of the introduction, or the behavior of its prey, among others (Richardson et al. 2000; Carthey and Banks 2012; Essl et al. 2018).

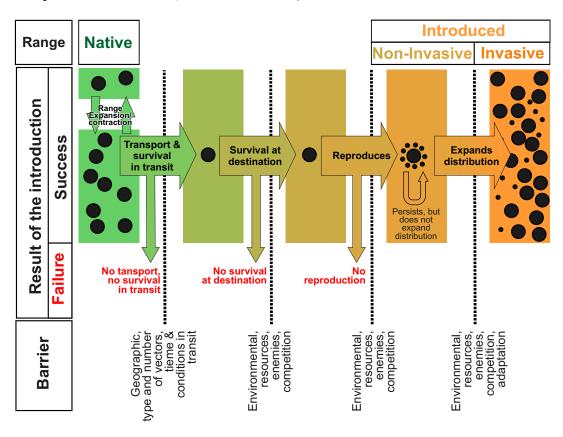


Fig. 3. Scheme of the phases of a biological introduction and the barriers involved in the process.

Concern about human-assisted species introductions and range expansions fostered the development of a discipline known as Invasion Biology. Its central goals are the investigation of species traits that favor their dispersal and establishment with the aid of man, the traits of communities and ecosystems that make them more receptive to IS, the mechanisms that explain the responses observed, the ways in which IS adjust to, and interact with, their new environments, and the impacts of biological introductions on the ecology of the invaded systems, and on human interests. All of the above, in turn, are linked to analyses of strategies related to the eradication and control of IS (Clout and Williams 2009; Keller et al. 2009; Wilcox and Turpin 2009).

2. The beginnings

Although the cornerstone of the studies of biological invasions is widely considered to be the book by the British ecologist Charles S. Elton, "The ecology of invasions by animals and plants", published in London in 1958 (Elton 1958) (Fig. 4), there are many occasional published references to IS since at least the XVIII century. Some of these are related to the search for economically important species, such as the plants surveyed by Pehr Kalm, a disciple of Carl Linnaeus, in North America, where he recorded many plants and animals of European origin, including, for example, the common dandelion (Taraxacum officinale), which was growing abundantly in French Canada when Kalm visited the area in 1749 (Kalm 1771). Other such observations were reported by famous naturalists, such as Charles Darwin and Alexander von Humboldt, who recorded many redistributions of organisms by human activities around the world. Darwin, for instance, discussed plant species introduced by people in his seminal book "On the origin of species", which was published in 1859 (Darwin 1859).

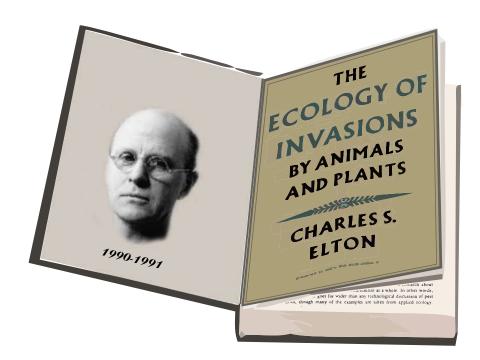


Fig. 4. Charles Sutherland Elton (1900–1991), the British ecologist that pioneered the study of biological invasions, and the cover of his seminal book, published in 1958.

However, it was Charles Elton (Fig. 4) who, for the first time, gathered in a single volume centered specifically on IS a large part of the existing knowledge on this phenomenon, and included his own observations and interpretations of the process of human-assisted species introductions itself and its consequences. His work includes many documented examples of biological introductions around the world, their impacts on nature and on

human welfare (almost exclusively focusing on the negative ones), and the strategies of prevention, mitigation and control attempted with and without success. The book also contains Elton's general thoughts about the need to maintain the pristine state of ecosystems, and anecdotal but illustrative remarks. For example, he describes how the entomologist J. G. Myers, in his 1929 voyage on the cargo ship Rangoon, from Trinidad to Manila, entertained himself recording the animals present on board, which totaled 41 stowaway species, including the red flour beetle (*Tribolium castaneum*), a worldwide pest of stored food grains. In his analyses of commercial marine transportation as a vector of introductions, Elton mentions the chart known as document B.R.84 in the archives of the British Admiralty. This chart (not included in the book), shows the positions of the 2314 British vessels on 7 March 1936 (Fig. 5). This figure is impressive for revealing the intensity of marine traffic almost a century ago.

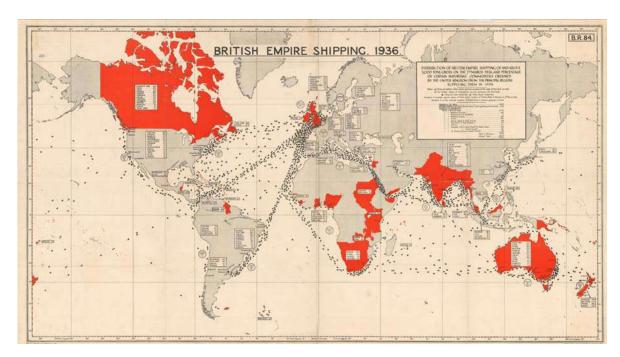


Fig. 5. Chart produced by the British Admiralty showing the position of the 2314 British ships over 3000 tons (852 of them in ports) on 7 March 1936. Red denotes British Empire possessions. At the time, British ships accounted for around 50% of the world total. Presently, the number of commercial vessels in the world is around 50 000. From Chew (2014).

Elton was strongly conservationist, and watched with dismay how the native flora and fauna were "contaminated", in his opinion, with alien organisms. His views on human-mediated dispersals of species are vividly summarized in the phrase "No one really knows how many species have been spreading from their natural homes, but it must be tens of thousands, and of these some thousands have made a noticeable impact on human life: that is, they have caused the loss of life, or made it more expensive to live." His opinion on introductions in insular areas, more isolated and presumably more vulnerable, was even more pessimistic: "The fate of remote islands is rather

melancholy... The reconstitution of their vegetation and fauna into a balanced network of species will take a great many years."

Elton's book, cited in thousands of publications (Fig. 6), is undoubtedly an influential work, but it is also clearly biased and tends to focus on the IS that turned out to be more successful, and often more harmful, in the world. The title he chose for this pioneering work is also partly responsible for the fact that the field focused on the ecology of IS is presently known as "Invasion Biology", a name with clearly negative and militaristic connotations. Alternative names, such as SPRED (SPecies REDistribution) Ecology (Davis 2009), have been proposed in an attempt to avoid such *a priori* biases, but the catchy and now deeply entrenched "Invasion" term (sometimes more precise, but also often more convenient) turned out to be more appealing for most scholars in this field.

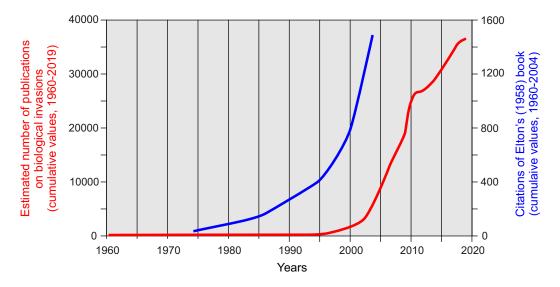


Fig. 6. Growth in the number of publications on biological invasions between 1960 and 2019, and number of citations to Elton's (1958) book, between 1960 and 2004. Elton's citations from Richardson and Pysek (2008).

Elton's work had little impact until the 1990s, when interest in invasion biology started growing exponentially (Ricciardi and MacIsaac 2008; Richardson and Pysek 2008). This delay was due, at least in part, to the fact that some of the most spectacular and most damaging biological invasions were recorded in the 1980s and 1990s. Among these was the establishment of the Nile perch (*Lates niloticus*) in Lake Victoria (Africa), the alga *Caulerpa* spp. in the Mediterranean and elsewhere, and the Eurasian zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) in North America (Rilov and Crooks 2009; Nalepa and Schloesser 2014; Canning-Clode 2015; Dudgeon 2020).

3. The pathways

The introduction vectors for IS are numerous, but two main different mechanisms can be identified: deliberate introductions and accidental introductions, although differences between the two are often imprecise and difficult to assess (Essl et al. 2018), and many species have been introduced both intentionally and accidentally (Turbelin et al. 2017). Among the deliberate or intentional ones of the last ~200 years are many of those carried out between the XIX and the middle XX centuries. The most frequent were ornamental plants, pets (mainly fishes, reptiles, birds, and mammals), as well as a number of wild animals released in various habitats.

Argentina hosts over 800 IS, with many examples of plants and animals introduced deliberately in the XIX and XX centuries. Many have adapted to the local conditions and are presently part of the local ecosystems and are interacting with native plants and animals over large areas. Several widespread plants were brought from Europe and Asia, including the silver poplar, thistle, privet, honeysuckle, nettle, white cedar, sweetbriar rose, Aleppo sorghum, blackberry, and many others. From North America several pine species were introduced, and the eucalyptus tree was brought from Australia. Among the introduced animals some of the most notorious are the common carp, red deer, wild boar, European hare, trout and salmon, mink, bees, etc. (Fig. 7; Correa and Boltovskoy 1998; Penchaszadeh 2005; Chebez and Rodríguez 2014; Schwindt et al. 2020).

Throughout the world, terrestrial plants used in horticulture are dominant among the deliberate introductions (Turbelin et al. 2017). Accidental introductions are associated with the movement of people, and the transport of live plants and animals, and goods and their packaging. Aquatic organisms are chiefly dispersed by ballast water and hull fouling. Ballast water is taken onboard in special compartments - the ballast water tanks, in order to compensate for the weight of cargo and fuel, enhance stability and maneuverability in transit, and mitigate vibrations. An unloaded ship typically compensates for its low weight by filling the ballast water tanks in the port of departure and emptying them in the port or ports where cargo is loaded (bulk, containers, liquids, etc.). Around 10 billion tons of ballast water per year are discharged in areas away from their origin, transporting ca. 40 thousand species per day (David and Gollasch 2015). Most of these species die during transport, and many cannot survive where released. Some, however, survive the voyage (either as adults, or in their larval or reproductive stages, like spores, seeds or cysts), and if the new site is favorable, get established (Fig. 3).

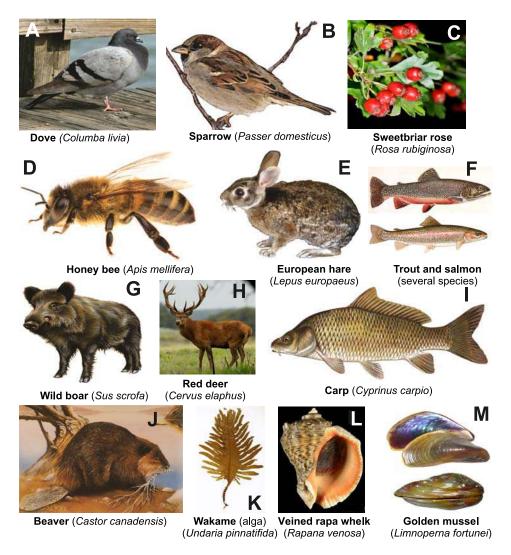


Fig. 7. Some species introduced in Argentina in the XIX and XX centuries. Most are deliberate introductions, except for the last three (wakame, veined rapa whelk, and golden mussel). Sources: A: https://allaves.ru/; B: https://www.pinterest.it/pin/253749760239560261/; C: https://zoom50.wordpress.com/2010/11/18/rosa-mosquetarosehip/; D: http://www.conap.coop.br/2016/01/15/agrotoxicos-estao-matando-as-abelhas/; E: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Liebre.png; F: https://www.mymotherlode.com/wp-content/uploads/2020/04/trout.jpg; G: http://www.farcaza.es/descargas; H: http://www.argentinahuntingandfishing.com/es/actividades.html; I: https://www.fishidy.com/resources/species/54e359a10d539d16d488ee44; J: https://hipwallpaper.com/view/vQBA67; K: https://doris.ffessm.fr/Especes/Undaria-pinnatifida-Wakame-1616; L: http://www.gastropods.com/1/Shell_1631.shtml http://www.gastropods.com/1/Shell_1631.shtml; M: Original.

4. Temporal evolution and geographic distribution of biological invasions

Cultivated plants and domesticated animals are but a few early examples of biological introductions. The rate of introductions has been growing, especially since the middle XIX century, fostered by the increasing human mobility and commercial exchange. Recent estimates (Seebens et al. 2017) suggest that, in spite of the many regulations and management initiatives at the national, regional and international levels, the trend is far from decreasing, although patterns differ widely between organisms. For example, mammal introductions have dropped noticeably since the middle XIX century, but introductions of algae, insects, molluscs, crustaceans and other invertebrates keep rising (Fig. 8).

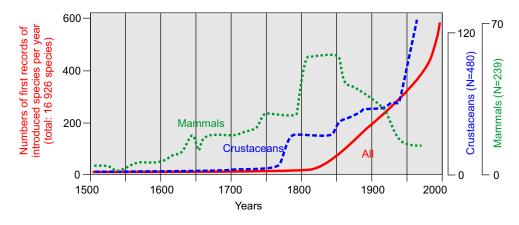


Fig. 8. Growth in the numbers of introduced species around the world between 1500 and \sim 2000, based on an overall total of 16926 species, and contrasts between some selected groups. From data in Seebens et al. (2016).

According to Turbelin et al. (2017), of the 1517 world IS recorded in the Global Invasive Species Database and the CABI Invasive Species Compendium, 39% were introduced intentionally only, 26% accidentally only, 22% both ways, and for 13% information is missing. Terrestrial plants account for over half of the introductions, followed by arthropods and other organisms (Fig. 9). The countries with the highest numbers of IS are the USA, Australia, New Zealand and South Africa. Argentina and Brazil have medium-high numbers, along with most of Europe, China and India. Lowest values are those in African and Arab countries, as well as some in Asia (Fig. 10). Of course, determining and comparing the numbers of species introductions in various regions are also dependent on the extent of the research efforts and resources spent looking for, and documenting, such introductions in different jurisdictions. Obviously, the more researchers are focusing on introduced species, the more such species they are likely to be found, so, to some extent, the growing number of species perceived as introduced may be a function of the rise of Invasion Biology.

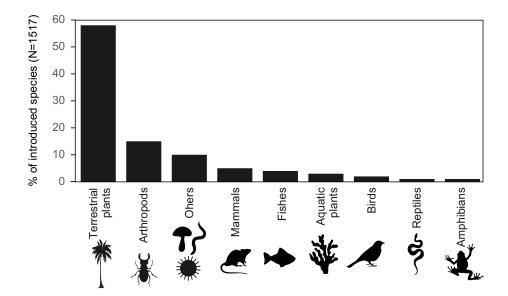


Fig. 9. Proportions of various introduced plant and animal groups worldwide, based on a total of 1517 introduced species recorded in the Global Invasive Species Database and the CABI Invasive Species Compendium, in the 143 countries included in the survey. "Others" includes algae, annelids, turbellarians, fungi, microorganisms (including virus), molluscs, nematodes, and parasites. Notice that the total number of introduced species is less than 10% of those identified by Seebens et al. (2016) (Fig. 8). From data in Turbelin et al. (2017).

An interesting outcome of this work (Turbelin et al. 2017) is the balance between the number of IS that each country spread to others and the number of IS it received. These numbers show that, again, the USA, Australia and New Zealand were affected the most, having received more IS than those they were donors of. At the other end are some Latin American countries, most of northern Africa and eastern Eurasia. Although these results are based on a small subset of species (less than 10% of the ~17 thousands identified by Seebens et al. (2017), they agree well with the magnitude of commerce and travel between countries in the world (Vilà and Pujadas 2001; Levine and D'Antonio 2003).

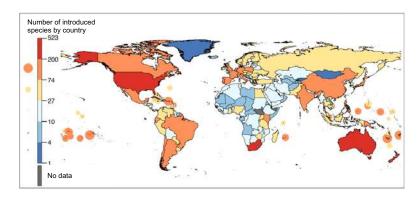


Fig. 10. Number of introduced species by country (based on a total of 1517 species recorded in the Global Invasive Species Database and the CABI Invasive Species Compendium). From Turbelin et al. (2017).

5. Competitive advantages of introduced species: the hypotheses

Invasion biology took off as a specific ecological discipline at the end of the 1980s, and since then the number of investigations grew exponentially. In 1990 the number of publications on IS was around 130. In 2019 it reached over 4000, accumulating an overall total (1962-2020) of over 40 thousand papers in research journals and several tens of books (Ricciardi and MacIsaac 2008; Richardson and Pysek 2008; Boltovskoy et al. 2018).

These efforts allowed detailed analyses of thousands of case studies and, as in other areas of science, fostered the search for general rules aimed at explaining how and why IS succeed in outcompeting the natives (when they do so), and attempts at quantifying their impacts in ecological and economic terms. As a result, many hypotheses were proposed, some conceptually interesting, some truistic, and many redundant, overlapping and even contradictory (Richardson and Pysek 2008). These hypotheses include both assessments of community traits that make them more receptive to IS, and species traits that contribute to their invasive success, as well as impacts of IS on resident communities (Jeschke and Heger 2018). Enders and Jeschke (2018) attempted a systematic summary of these hypotheses based on five categories of intervening factors: time since introduction, human disturbances, properties of the system invaded, biotic interactions, and traits of the IS. The most widely discussed are the following:

Propagule pressure. Successful introductions are a function of the number of transport and release events, as well as the number of individuals involved in each event. While this hypothesis was discussed in hundreds of publications (Cassey et al. 2018), conceptually it is a null hypothesis (Colautti et al. 2006b), insofar as its fulfillment is embedded in its premise, regardless of other conditions. Indeed, unless the introduction is absolutely unfeasible

(e.g., elephants in the Antarctic), it is obvious that large numbers of individuals and many attempts at introducing an alien species are more likely to end up in success than few attempts and few individuals. A single shot at the target has fewer chances of hitting the center that 100 shots.

Evolution of increased competitive ability (or EICA) posits that, after having been released from natural enemies, IS change genetically investing more energy in growth and/or reproduction, thus making them more competitive (Blossey and Nötzold 1995).

Enemy release. In the areas colonized, IS are free from the competition or predation pressure of the enemies they co-evolved with (Keane and Crawley 2002).

Prey naïveté. Due to lack of co-evolutionary history, native prey organisms do not recognize the introduced predator as dangerous, and are therefore more vulnerable (Cox and Lima 2006). However, the opposite - and contradictory - situation is as likely as the former: the introduced predator does not recognize native prey as a potential food resource (predator naïveté: Howard et al. 2017).

Vacant niche and biotic resistance (or diversity vs. invasibility) posits that in diverse communities ecological niches (or functional positions) are more saturated, vacant niches to accommodate new species are scarcer, and therefore they are less vulnerable to introductions than low-diversity communities (MacArthur 1970). However, it has also been argued that higher diversity is the result of more previous colonization events, and therefore might be associated with a higher receptivity to IS.

Invasional meltdown. The theory behind this catchy term is that past introductions favor subsequent ones (Simberloff and Von Holle 1999). Testing this hypothesis is equivocal, because high numbers of IS might effectively be due to invasional meltdown, or to the fact that the community under scrutiny is inherently more receptive to IS (Mizrahi et al. 2017).

Disturbance. IS are more successful in disturbed systems (e.g., pollution, urbanization, grazing by cattle, fire), than in intact ones (Elton 1958). However, the association of most disturbances with human presence complicates disentangling the effects of the disturbance itself from those of the enhancement of accidental or deliberate transport and release due to human presence.

Trophic relationships. Since trophic interactions are among the most important between organisms, it has been proposed that IS of low trophic levels (i.e., those that are consumed by others, like plants) should generally have positive effects because they broaden the spectrum of resources, whereas

consumer IS should generally have the opposite effect, decreasing the abundance and diversity of the natives (Thomsen et al. 2014).

These hypotheses are but a small sample, probably the most often discussed, of the 30-35 proposed in the last decades (Jeschke and Heger 2018; Crystal-Ornelas and Lockwood 2020a). Enders et al. (2018) carried out an interesting experiment through an online survey of 357 experts in invasion biology in order to assess the degree of knowledge, overlapping, and acceptance of 33 invasion biology hypotheses. Their conclusion was that the resulting network of similarities between hypotheses was random, indicating that specialists have little understanding of and consensus on of how these hypotheses are related to each other. On the other hand, there was a statistically significant coincidence in the support for four of the 33 hypotheses (enemy release, propagule pressure, disturbance, and vacant niche).

The growth in the number of surveys in all the fields of knowledge called for the need and allowed the implementation of reviews and meta-analyses. Meta-analyses consist in the extraction of results from different sources and their statistical evaluation based on a common indicator, usually the effect size (Gurevitch et al. 2018). In principle, meta-analyses have the advantage of avoiding the subjectivity that can bias the less methodologically strict approaches of narrative reviews.

A survey of 72 meta-analyses on biological invasions in aquatic and terrestrial habitats based on 4822 primary sources included an estimate of the support for several major hypotheses (Boltovskoy et al. 2020). The assumption that IS have or acquire superior competitive abilities (EICA) was confirmed by 4 meta-analyses, but rejected by 6, and 5 arrived at mixed or inconclusive results. The enemy release hypothesis was found to play a major role in 3 meta-analyses, but was rejected by 5, and 2 found inconclusive support. Prey naïveté was confirmed in one meta-analysis, and partially supported by one, but rejected by 2. The vacant niche hypothesis was supported by 3 meta-analyses, but rejected by 2. Invasional meltdown was confirmed by 2 meta-analyses, rejected by 2, and one arrived at mixed results. The assumption that IS of low trophic levels have positive effects on the residents was confirmed in 3 surveys, and 2 found mixed evidence. However, the ensuing conclusion that introduced plants have more positive (and less negative) effects on native animals than on native plants did not hold across studies. One of the most widely held notions is that the impacts of IS are significantly stronger on islands than in continents. Of the 4 meta-analyses that addressed this issue explicitly, only one supported it.

Among the 30+ hypotheses proposed some are likely "zombie ideas" (Fox 2011), that survive in spite of their lack of logic and empirical support due their apparent theoretical elegance and pervasive repetition. Others have

reasonable conceptual grounds and at least some empirical support. However, although one should not expect that any one explanation will fit all invasions (Catford et al. 2009; Ricciardi et al. 2013), these discrepancies with respect to basic tenets of the theory of biological invasions are discouraging (Moles et al. 2012). Most studies are at least as likely to reject as to support these popular invasion biology hypotheses. Moreover, support for these hypotheses has been declining over time (Jeschke et al. 2012), which may be partly explained by the underpublication of null results in the early years after a hypothesis is proposed (Mueck 2013), and especially by the fact that the growth of empirical knowledge leads to a growing recognition of complexity and ambiguity (Davis and Chew 2017), defying the strict bounds imposed by these attempts at establishing universal cause-effect relationships (Hulme et al. 2013; Boltovskoy et al. 2020).

6. Native, introduced or invasive?

Our concept of harm or benefit associated with biological introductions is tightly intertwined with personal outlooks on the issue of conservation which, in turn, are based on the value we assign to an ideal original or pristine state. However, this pristine state has many shades which often make it an equivocal notion (Hobbs et al. 2009; Pereyra 2016; Jernelöv 2017; Orth et al. 2020; Pereyra 2020). Cassini (2020) proposed an interesting discussion of the ethical and cultural implications of idealizing native species suggesting that, for many conservationists, native flora and fauna represent the natural, correct, acceptable and positive situation, and therefore are worth maintaining, as opposed to IS, which are unnatural and undesirable (Brown and Sax 2004; Davis et al. 2011; Wallach et al. 2020).

However, even the distinction between native and introduced species is ambiguous. For example, there is no consensus on the length of time after introduction during which a species remains alien, or whether there is a time limit at all. Humans have been moving species around since prehistoric times (50-60 thousand years); should those species still be considered introduced today? In the British Isles over 150 plants introduced between 500 and 6000 years ago have been identified (Preston et al. 2004); scientists still disagree on whether these species should be considered native or introduced (Willis and Birks 2006).

Many plants and animals evolved in an area, dispersed elsewhere, went extinct in their original range, and were re-inserted in it by man; are they introduced? What is the status of the species moved between America and Eurasia five centuries ago? Will they be considered introduced forever? (Jernelöv 2017). Native prey animals have been shown to evolve introduced predator-avoiding adaptations (Carthey and Banks 2012); thus

circumventing one of main hypotheses of invasion biology - the "Prey naïveté" principle (see above). Many plants and animals changed their distributional ranges (in terms of latitude and/or altitude) in response to (human-driven) climate changes (Sorte et al. 2010; Webber and Scott 2012; Lenoir and Svenning 2015); are they introduced in their new ranges? (Gilroy et al. 2016). Most studies that compared the effects of IS with those of these range shifters concluded that both have similar effects on the newly colonized areas (Sorte et al. 2010; Hoffmann and Courchamp 2016; Nackley et al. 2017). However, because range shifts in response to climate changes ensure the survival of the species involved, it has been suggested that they should not be labeled as undesirable (Davis and Watson 2018), and even that these displacements should be aided by man (Hoegh-Guldberg et al. 2008).

A pervasive problem, especially in areas with scarce information, is whether a newly recorded species is truly introduced, or if it was overlooked in earlier surveys due to the paucity of data or to the absence of historical information (Bortolus et al. 2015; Guiaşu and Labib 2021). Although these doubtful records are usually labeled as cryptogenic (uncertain origin), considering them as introduced is currently perceived as a more important finding and, therefore, with better chances of being published. The new record that 20 years ago could have been entitled "New record of *Protozoa sconosciutta* in...", today appears under the title "The invasive species *Protozoa sconosciutta* and its potential impacts on...".

With the aim of solving these problems and improving communication, several scholars tried to address these ambiguities and disagreements in the terminology used in the discipline by proposing a unified language (Richardson et al. 2000; Colautti and MacIsaac 2004; Davis 2009). However, their success has been very limited (Sagoff 2018), and they were strongly criticized (Larson 2007; Hodges 2008). Discrepancies are not restricted to the concepts of "native" vs. "introduced". The terms "introduced" and "invasive", which (as they suggest) should define different situations, are often used interchangeably. In spite of the fact that "invasive" is a value-laden term with clear negative connotations, it dominates not only scientific reports (Pereyra 2016), but also documents issued by international organizations that include the notion of harmful impact in their statements on IS (IUCN 2018; Soorae 2018).

7. Problems associated with biological invasions

There is no doubt that the impacts of some IS are extremely harmful for the environment, many native species, and for human interests. Many pests of cultivated and human and animal pathogens are clear examples of major damage. Introduced pathogens can parasitize humans and their vectors can spread diseases, ruin crops, decimate domesticated animals, and strongly impact human resources (food, water, etc.; Sumner 2003; Davis 2009; Keller et al. 2009; Simberloff and Rejmanek 2011).

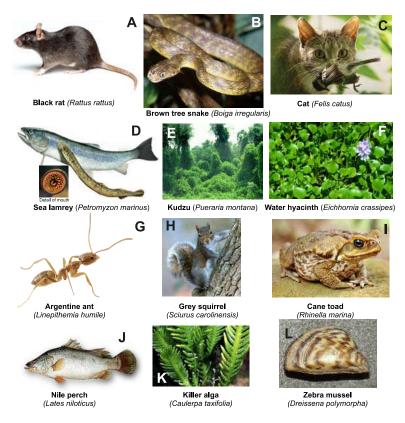


Fig. 11. Some iconic invasive species that had important impacts around the world. From various sources.

The black rat (*Rattus rattus*, Fig. 11A), a native of Southeast Asia, is one of the best known and frequently mentioned examples. Its worldwide dispersal started before the Roman Empire through shipping and overland trading and military campaigns, and presently the rodent is present in all continents. The rat transmits numerous infectious diseases, and is a pest of many human resources (Nentwig 2008). On some islands, rats (along with feral cats, dogs, and pigs) have extirpated many native species, in particular birds (Drake and Hunt 2009; Doherty et al. 2016).

The brown tree snake *Boiga irregularis* (Fig. 11B), a native of New Guinea, invaded the island of Guam around 1945-1950. Guam lacked animals large enough to feed on the snake, but had many native birds and mammals. Towards 1970, practically all native Guam birds and bats had been eliminated by the snake (Fritts and Rodda 1998). However, because the brown tree snake population on Guam has exceeded the carrying capacity of the island, its densities are currently declining as a result of depleted food resources, adult mortality, and/or suppressed reproduction (Mortensen and Dupont 2008).

Since the early XIX century, in order to allow sea-going merchant vessels to operate in the Great Lakes of North America (USA- Canada), a complex system of canals started being built linking the lakes with the North Atlantic Ocean. By bypassing the Niagara Falls, these canals provided an entry route to a parasitic fish, the sea lamprey *Petromyzon marinus* (Fig. 11D), which feeds on other fish. The lamprey thrived in the lakes decimating several local fishes of major economic value. By 1960, fish landings dropped by 98%, collapsing the local fishery. In subsequent years the fishery was restored, yet at the expense of several costly management actions which require permanent investment (Keller et al. 2015).

The vine kudzu (*Pueraria* sp., Fig. 11E) was deliberately introduced in the USA from Japan in 1876, primarily with the purpose of mitigating soil erosion. Although initially its cultivation was encouraged, and it effectively did mitigate erosion, as well as proved to serve as fodder, fertilizer, cosmetics, and some other uses, it dispersed uncontrollably covering 30 thousand km² throughout 12 states. In 1970 the US Department of Agriculture included kudzu in its list of weeds, and in 1977 in the list of noxious weeds. The vine climbs rapidly over grass, bushes and trees and smothers them by blocking sunlight, eventually killing them (Wilcox and Turpin 2009).

In Argentina, some IS have also had baneful impacts (Chebez and Rodríguez 2014; Schwindt et al. 2020) (Fig. 7), although not as devastating as the ones described above. In Patagonia, the sweetbriar rose outcompetes and displaces several native plants. The European hare and the red deer compete with cattle and sheep (which are also IS, of course) for food and favor soil erosion (as most introduced, economically valuable farm animals do). Trout and salmon impact native fish populations. The Asian carp feeds on native fish species and is a voracious omnivore that can deprive other freshwater organisms of food. In Tierra del Fuego, the beaver's dams flood large areas of native forest killing the trees (Lizarralde 2016). Negative impacts of some accidental introductions have also been reported. The marine macroalga wakame (Undaria pinnatifida) has been associated with a decrease in the abundance and diversity of native algae along the Patagonian coast (Casas et al. 2004), although subsequent studies noticed that it can significantly enhance the abundance and diversity of many invertebrates (Irigoyen et al. 2010). The veined rapa whelk (Rapana venosa) feeds on bivalves, including several commercially important species (Giberto et al. 2006). The golden mussel (Limnoperna fortunei) has mixed effects on the native biota (Fig. 12), but its impact on human activities is clearly negative, as its colonies clog water sieves and heat exchangers of industrial and power plants that use raw river, lake or reservoir water, as well as water-transfer canals and pipelines (Boltovskoy et al. 2015b).

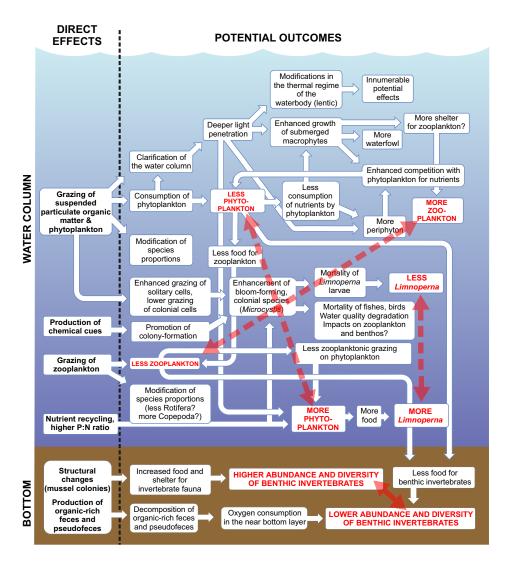


Fig. 12. Effects of *Limnoperna fortunei* on different freshwater communities and their potential outcomes. Red labels and the connecting dashed lines denote opposed impacts on the same component, which can occur simultaneously in the same waterbody, but their strength varies depending on the context. Modified from Boltovskoy et al. (2015a).

For introduced plants, most impacts are associated with the fact that they can outcompete native plants in the use of space, light, water and nutrients (Arceo-Gómez and Ashman 2016; Kuebbing and Nuñez 2016; Golivets and Wallin 2018). This effect can cascade to native phytophagous animals by reducing their food availability, as well as native predators, by reducing native phytophagous prey (van Hengstum et al. 2014; Yoon and Read 2016). For introduced animals, the most salient examples are those of predators that can strongly affect, and even extirpate, some native organisms (Salo et al. 2007). Total elimination of natives has been recorded in some islands and freshwater bodies, but it is uncommon on continents and in the ocean (Davis 2009; Doherty et al. 2016).

It is important to point out that in many cases impacts are subtle and take place through indirect pathways. For example, some introduced plants can promote fires, or favor allergic reactions in humans (Potgieter et al. 2017), or affect insects and birds that use them, rather than native plants, for reproductive activities, but with lower survival rates, or negatively affecting various mutualistic relationships (Davis 2009). Hybridization with natives can produce sterile or less fit offspring (Cox 2002), but native-introduced hybrids more fit than their parents have also been described (Lockwood et al. 2007). In mammals, IS can produce major changes in the sex ratio of native species (Barrientos 2015).

One of the widely held notions is that IS can negatively impact global biodiversity. At the local and regional scales IS can contribute to the roster of species increasing diversity (Peoples et al. 2020), but at global scales they can decrease diversity. For example, in the USA, the between-states similarity in fish species composition increased significantly after the European colonization, although this change was largely driven by the introduction of several important sport fishing species, rather than by the extinction of native fishes (Davis 2009). However, this process can also involve the extinction of natives and endemics (and the corresponding gene pools), particularly on islands (Vizentin-Bugoni et al. 2019), or changes in dominance relationships between the natives (Muthukrishnan and Larkin 2020). At the global scale, this can produce a structure with a few "winners" very efficient at colonizing new habitats, and many "losers" that are displaced by the former, with the consequent homogenization and reduction of the global species pool (McKinney and Lockwood 1999; Rahel 2007). Although IS have been identified as responsible for this process in several surveys, the overall outcome has been questioned (Rosenzweig 2001), and it has been noticed to change with the spatial scale employed (Daga et al. 2020). Further, this seems particularly noticeable in human-disturbed areas (urbanization, forestationdeforestation, agriculture and cattle raising, eutrophication, connectivity), which complicates interpretations insofar as it is hard to sort out the effects of the IS from those of these other human disturbances. This ambiguity led to the development of the "driver or passenger" notion, which questions whether disturbances (mostly caused by humans) are at the cause of biological invasions, or if biological invasions themselves are the driver of community or ecosystem changes (MacDougall and Turkington 2005; Bauer 2011; Gioria and Osborne 2014).

In short, practically all scholars agree that certain IS can have major negative impacts on the systems colonized, including deleterious effects on human interests, global biodiversity, and ecosystem services (landscape and recreational aspects, resources, etc.), and also admit that some have positive effects (chiefly cultivated plants and domesticated animals, but also IS which participate in mutualistic relationships with native species, for example). However, the large majority of studies on IS focus on the baneful aspects

(Boltovskoy et al. 2020; Vimercati et al. 2020). Many publications on IS start with boilerplate statements like "ecosystems are dominated by introduced species, leading to loss of biodiversity and ecosystem function" (Davis 2009; Thompson 2014; Warren et al. 2017; Sagoff 2018), fueling an apocalyptic vision of the impacts of invasions (David et al. 2017).

This perception of the impacts of IS is also partially due to methodological issues. The research designs can focus on two questions with subtle, but important differences. The first approach, used by most studies, compares habitats without vs. habitats with IS: does the presence of the IS change significantly the variables measured (resident abundance, diversity, etc.) in the two habitats? Or, alternatively, with respect to the same habitat before the species was introduced? The second approach involves more sophisticated, and much less frequently used designs, but conceptually more correct for searching the answers sought: are the impacts of IS larger than those of functionally similar native species? Or, alternatively, are the impacts of IS larger in their introduced ranges than in their home ranges? (Boltovskoy et al. 2020). The former strategy is simpler and more straightforward, but it involves the addition of a new element to the system, which inevitably has to have some effect on the residents, regardless of how it got there (Thomsen et al. 2015; Guiaşu 2016). Thus, it deals with a general ecological issue, rather than more specifically with the impact of a species added with human intervention. The second design is more specific because it effectively compares the impacts of an IS with those of a native (Leffler et al. 2014). In fact, several of the hypotheses reviewed above require explicit comparisons between native and invasive ranges (Hierro et al. 2005). These different approaches likely explain the fact that the number of significant IS-native differences is much larger when using the first design, than when using the second (Boltovskoy et al. 2020).

Obviously, negative impacts are not restricted to IS. For example, as Davis et al. (2011) pointed out, the mountain pine beetle (*Dendroctonus ponderosae*) is a native species which kills more trees in North America than any other insect. In Argentina, many native or cosmopolitan species have undesirable impacts on the environment, on other organisms, and on the economy. Toxic strains of the cosmopolitan (van Gremberghe et al. 2011) freshwater cyanobacteria *Microcystis aeruginosa* are responsible for blooms that cause massive fish and bird mortalities, and can severely affect human health (Carmichael 1994; Pizzolón et al. 1999; Merel et al. 2013; O'Farrell et al. 2019). The native predators puma (*Puma concolor*) and foxes (*Lycalopex culpaeus, L. gymnocercus*) are major threats for domesticated animals, particularly sheep, in many areas of the country (Elbroch and Wittmer 2013; Periago et al. 2017; Llanos and Travaini 2020). The guanaco (*Lama guanicoe*) competes with sheep for food and its grazing strongly affects southern beech (*Nothofagus* spp.) forests (Quinteros et al. 2017).

Positive impacts of IS are very common (Goodenough 2010; Rodriguez 2016; Collins 2017, Silknetter 2020, Albertson et al. 2021). Returning to the Argentine examples (Fig. 7), bees sustain the honey industry, and are of major importance for the pollination of a large number of plants. The dove, wild boar, hare, deer, and trout and salmon are targets of sports hunting and fishing. The sweetbriar rose is used for manufacturing jelly, infusions and cosmetics. The carp is a freshwater resource of some value, and its omnivorous habits can mitigate the growth of aquatic vegetation in freshwater bodies, including water transfer canals. In Tierra del Fuego, the beaver is used for the promotion of tourism and facilitates fishes. The alga wakame is cultivated and/or harvested for human consumption in several countries (Japan, Korea, France, Australia, New Zealand). The larvae and adults of the golden mussel are an important source of food for over 50 South American fish species (Cataldo 2015; Paolucci and Thuesen 2015), and also probably reptiles, birds and aquatic mammals (Sylvester et al. 2007).

Insofar as all organisms use resources to survive, both introduced and native species have negative impacts on some members of their communities and positive impacts on others (Fig. 12), and their impacts on human interests are very often mixed.

8. The two currents

During its brief history, the field of biological invasions attracted the attention of the most prominent ecologists of the last decades, both due to its interest as large-scale experiments of the interaction between species, and because of its cultural, emotional and economic implications. Interest went far beyond academia (biologists, sociologists, economists, philosophers), extending to popular science and news media, as well as the agendas of organizations involved in environmental policies and management. However, it was only in the 1980s when invasion biology started acquiring a major conservation dimension. Despite the strongly conservationist approach of Elton's book (published in 1958), his perspective was scarcely reflected in publications between the 1960s and the 1980s, which were centered on genetic, evolutionary and ecological theory aspects (Davis 2006). Neither did these early surveys make much use of terms with negative, militaristic, and xenophobic connotations such as "invasion", "pest", "plague", "alien" or "exotic", which became widespread after the establishment of the Society for Ecologic Restoration (in 1987). It was also in the 1980s when, inspired by the restoration ecology movement, a sharp distinction based on geographic origin started to occupy the center stage, with native species being desirable and non-natives being undesirable (Davis 2006; Goodenough 2010; Wallach et al. 2020). In the 1990s the discipline began growing vigorously (Fig. 6), and also aligned more sharply with conservation, a relationship that persists to this

day. At the same time, the divide separating two different currents of thought was gradually reinforced. Most scholars adhered to Elton's stand, advocating geographic origin as a major predictor of potential negative impacts. Simply put, this tenet claims that all IS are harmful by default, and therefore guilty until proven innocent (Guiaşu 2016), a trend described as "guilt by association" by Guiaşu and Tindale (2018). This viewpoint was adopted in the Rio Declaration on Environment and Development of 1992: "Where there are threats of serious or irreversible damage, lack of full scientific certainty shall not be used as a reason for postponing cost-effective measures to prevent environmental degradation." In relation to IS, this statement has two issues of interest. First, preventive measures should be undertaken even when the threat is not certain, thus endorsing the precautionary principle widely heralded in thousands of surveys. Second, the rather cryptic statement related to "cost-effective measures" seems to suggest that investment in these measures should be proportional to the damage expected. However, estimates of economic damage are almost invariably very debatable (see below) (Jernelöv 2017).

On the other hand, a smaller group of researchers adopted a less radical position, suggesting that the core of IS-related issues are the ecological processes that occur upon adding a new species to a community, rather than geographic origin, and that these processes vary widely depending on the species and habitats involved, among many other factors (Davis 2006; Thompson 2014; Guiaşu 2016; Jernelöv 2017; Sagoff 2019). In other words, geographic origin is not an indicator of the likelihood of harm; every introduction is a particular event that can have more negative than positive impacts, or the other way around, and usually effects are mixed and highly variable between species and communities. One of the consequences of this stand is that the search for general rules (the hypotheses) is not a fruitful task because there are no general rules.

Although discussions around these issues emerged repeatedly in the literature, they were based on facts and stayed within the bounds of reasonable evidence-based academic arguments. However, in recent years debates became increasingly aggressive, and arguments switched from scientific data to personal accusations of ignorance and purposeful fabrication of results.

In June 2011, Mark Davis and 18 coworkers published a short note entitled "Don't judge species by their origins" (Davis et al. 2011), where they argued that conservationists should focus much more on the functions of species, and much less on where they originated (Brown and Sax 2005; van der Wal et al. 2015). Further, they questioned costly and unnecessary attempts at eradicating IS. A month later, Daniel Simberloff, with the endorsement of 141 colleagues, published in the same journal a rebuttal to M. Davis stating that geographic origin is of prime importance, and that

precluding introductions and eradicating/controlling IS are widely justified by the precautionary principle (Simberloff et al. 2011).

A few years later some conservation ecologists started producing papers centered on the same disagreement, but rather than supporting their arguments with scientific data, they resorted to accusations of ignorance, denialism of facts and scientific consensus, fabrication of results based on spurious motivations, and even urging journal editors to reconsider acceptance of "denialist" essays (Richardson and Ricciardi 2013; Russell and Blackburn 2017a; b; Ricciardi and Ryan 2018a; b; Cuthbert et al. 2020). These articles were rebutted by the scholars questioned, as well as by several others who strongly disapproved of the arguments used and the obvious manipulation of data in some of the claims (Briggs 2017; Crowley et al. 2017; Olenin 2017; Boltovskoy et al. 2018; Guiaşu and Tindale 2018; Sagoff 2018; Frank 2019; Guerin 2019; Munro et al. 2019; Davis 2020; Gbèdomon et al. 2020).

Thus, unexpectedly, far from fostering convergence and agreement, the growing volume of information fueled conflicting points of view. However, most regrettably, the discussions became belligerent and abandoned the bounds of reasonable scientific debate entering the swampy and sterile grounds of personal accusations and name calling, which warded off the possibilities of reaching a consensus even further. There are several reasons which can account for this situation.

The growing numbers of case studies with conflicting results confirmed the heterogeneity of the impacts of IS, questioning many key issues, from basic definitions (e.g., "native", "introduced", "invasive", Fig. 3), to the hypotheses proposed, as well as the qualification of the impacts and the feasibility of discerning with reasonable confidence the negative ones, from the neutral and the positive (Jeschke et al. 2014; Kamenova et al. 2017). Support for the conservationists' arguments is also partly explained by the fact that most studies focused on the highly visible IS, with major effects on the biota, rather than on a random selection of IS (Radville et al. 2014; Guerin et al. 2018; Boltovskoy et al. 2020).

Idiosyncratic and convenience-driven factors have also likely been important. The conservation-oriented education of most ecologists is probably a major reason for endorsing this current. This inclination can be traced in some studies where the conclusions of major IS impacts are not supported by the actual results presented (Montero-Castaño and Vilà 2012; Gallardo et al. 2016; Suárez-Jiménez et al. 2017; Ferlian et al. 2018). However, a key motive seems to be the intention and the need to underscore the importance and social relevance of the issue dealt with in a dissertation, manuscript submission or grant proposal. The chances of getting published or receiving a research grant are obviously higher if one succeeds in convincing editors or

granting agency committees that the introduction in question is a major threat to the environment and/or the economy, than if no significant problems or changes occurred or are expected (Thompson 2014). This bias has been noticed in published research, where significant results and important negative impacts are over-represented (Byers et al. 2002; Pysek et al. 2008; Warren et al. 2017; Vimercati et al. 2020).

9. More on problems associated with biological invasions: the other outlook

Since its beginnings, the discipline of biological invasions has strived to answer the question of what fraction of the IS are effectively harmful in ecologic, economic, and ecosystem service terms. In the mid-1980s, the "tens rule" was proposed: 10% of the IS succeed in establishing themselves upon release, and of these 10% end up being harmful (Williamson and Brown 1986). However, as many other heuristic rules, this one is very debatable, and although it was generally endorsed by some studies, many others rejected it (Davis 2009).

Several studies tried to quantify the economic losses due to IS. Most were surveys restricted in time and space, and often centered on one or a few species, including pathogens (Sumner 2003), and in restricted areas (Perrings et al. 2001; Colautti et al. 2006a; Keller et al. 2009; Walsh et al. 2016). The most ambitious and encompassing work is a series of articles edited by David Pimentel (Pimentel 2002) with estimates for several countries, revised some years later (Pimentel et al. 2005; Pimentel 2011). Pimentel concluded that the overall world economic losses due to IS amounts to 1.4 trillion US dollars per year, or 5% of the world GDP. Pimentel's estimates had a major impact on the discipline, and were cited in thousands of publications, but although the economic losses due to many introduced pathogens and plagues are effectively huge, these estimates are clearly biased and very imprecise. For example, they ignore the economic benefits of most IS, the costs include control and eradication programs often of questionable need, harmful alien and native species are lumped together in some estimates, and for many IS the values given are highly speculative and poorly supported (Lockwood et al. 2007; Davis 2009; Pearce 2015; Guiaşu 2016; Sagoff 2019).

A more nuanced approach to the problem was provided by the comprehensive analysis of Vilà and Hulme (2017), who concluded that cost estimates are extremely complex and their net result can differ widely depending on the stakeholders involved. For example, in New Zealand the Monterey pine, *Pinus radiata*, has invaded natural areas, yet its value as a forestry crop amounts to more than US\$ 10 billion (Vilà and Hulme 2017). Even management costs may be viewed as benefits, as in the Working for

Water program in South Africa where the costs of labor required to remove non-native trees were seen as a social benefit because this task provided employment for marginalized sectors of society (Vilà and Hulme 2017).

Further, complications arise when the same IS has opposite effects on different ecosystem components, or losses associated with one IS are canceled out by another IS. For example, Walsh et al. (2016) assessed the costs of the decrease in water clarity due to the invasion of Lake Mendota (USA) by the predatory planktonic crustacean *Bythotrephes longimanus*. However, shortly afterwards the same lake was invaded by another IS, the Caspian Sea zebra mussel (*Dreissena polymorpha*), which was predicted to significantly enhance the water clarity of the lake (Reed-Andersen et al. 2000).

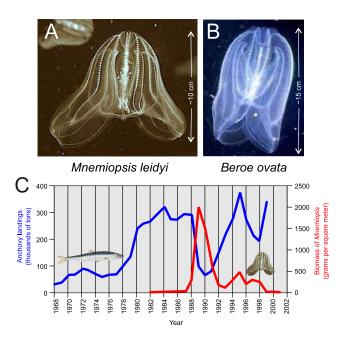


Fig. 13. The ctenophores *M. leidyi* and *B. ovata*, and changes in Black Sea anchovy landings between 1968 and 2002. A: from https://es.wikipedia.org/wiki/Mnemiopsis_leidyi; B: from http://www.sevin.ru/top100worst/priortargets/ctenophora/ovata.html; C: modified from http://www.biomareweb.org/3.3.html.

A particularly interesting case is that of the ctenophore (a planktonic gelatinous marine invertebrate) *Mnemiopsis leidyi*, that accidentally invaded the Black Sea around 1982 (Fig. 13A). This animal is a voracious consumer of zooplankton, including fish larvae. By 1990, *Mnemiopsis* collapsed the fisheries of all bordering countries (Turkey, Romania, Bulgaria, Ukraine, Russia), particularly the anchovy, whose landings fell 90%. However, in the 1990s another ctenophore, *Beroe ovata*, was introduced (also accidentally) (Fig. 13B). *Beroe* feeds chiefly on *Mnemiopsis*; it rapidly decimated the populations of the first invader and, when its food declined, *Beroe*'s densities

also decreased, but kept the numbers of *Mnemiopsis* at levels compatible with a total recovery of fish stocks (Rilov and Crooks 2009) (Fig. 13C).

A widely used argument, embedded in several of the hypotheses reviewed above, is that IS have disrupting effects on resident communities because they affect interactions established during thousands to millions of years of co-existence. However, the rates at which communities can adjust to change are probably much faster than envisioned. The island of Oahu (Hawaii) is one of the most invaded sites on the planet (Anthony 2017). Many of its native plants and almost all vertebrates (including birds, responsible for the dispersal of most plants) have been replaced by IS. A thorough survey of the degree to which introduced birds have filled in the void left by the disappearance of native birds in seed dispersal of plants showed that the efficiency of the introduced birds is extremely high (Vizentin-Bugoni et al. 2019). These results suggest that highly complex interactive networks do not necessarily require long co-evolutionary periods, which contradicts the notion that long-term coexistence and co-evolution must contribute to more complex and mutually more beneficial relationships, and thus decrease competition pressures (Thompson 2005). In addition, these findings reinforce the assumption that IS do not only displace native species, but they can also replace them functionally, restoring ecological functions which had been lost due to historic displacements and local or global extinctions (Janzen 1981; Vizentin-Bugoni et al. 2019; Wallach et al. 2020; Zwerschke et al. 2020), but also due to the massive human- and climate-driven extinctions which took place since the Late Pliocene (Lundgren et al. 2020), supporting the idea that eradication of these IS can have unexpected negative impacts (Vizentin-Bugoni et al. 2019).

A common problem associated with estimates of environmental and economic impacts is that they are usually largely based on the negative effects. This bias, clearly exemplified by Pimentel's work, is widespread in case studies, but less pronounced in meta-analyses. A recent survey by Albertson et al. (2021), focused on the positive interactions among freshwater organisms, concluded that the strength of the positive effects of non-invasive species is ~26% lower than that of invasive species. In the survey by Boltovskoy et al. (2020), the incidence of negative IS effects was based, on one hand, on the overall conclusions of the 72 meta-analyses reviewed, and on the other hand, on the 1526 partial results (usually cumulative effect sizes) of the 72 surveys. For the overall conclusions, one third of the meta-analyses found chiefly negative impacts, but in other two thirds the results were mixed and inconclusive (44%), or non-significant (25%). The 1526 partial results (across meta-analyses) showed that non-significant outcomes (57%) are more common than significant outcomes. Two thirds indicated that IS-native species trait differences and IS impacts are mixed, but when results are significant, IS are usually more fit or have negative impacts. However, these results are biased toward negative consequences for the natives by the fact that most studies were based on invasive IS with baneful impacts.

There are several other problems that complicate estimates of the magnitude and sign of the impacts.

Both case studies and the reviews and meta-analyses based on the former assess one or more traits of the organisms, populations, or abundance, communities, including biomass, production, growth, reproduction, diversity, competition, resource use efficiency, predation, physiological aspects, effects on the environment (nutrient recycling, organic matter, water turbidity, soil moisture, gas emissions, pH), etc. While the interpretation of some of these parameters is fairly straightforward (for example, if an IS decreases native diversity the outcome is negative), for others interpretation of the sign (type of impact) is more equivocal (Vimercati et al. 2020). As a rule of thumb, the decrease in the abundance of natives or residents in the presence of an IS is interpreted as a negative impact. However, this does not take into account whether the natives or residents affected are valuable organisms worth preserving, or if they are noxious and undesirable whose reduction is preferable. For example, in agreement with the above approach, the decrease of phytoplankton densities by the invasive zebra mussel Dreissena polymorpha (Higgins and Vander Zanden 2010) was categorized as a negative impact by Boltovskoy et al. (2020). However, in the waterbodies invaded this mussel can strongly reduce the densities of human waterborne pathogens (Conn et al. 2014) and cyanobacteria, including toxic strains of Microcystis sp. (Dionisio Pires et al. 2010; Higgins and Vander Zanden 2010), whose blooms have very strong negative impacts on aquatic animals and human interests (Carmichael 1994; Merel et al. 2013), and are the target of costly control programs worldwide (Huisman et al. 2005; Rastogi et al. 2015).

Caveats associated with bulk evaluations of impact and generalizations are not restricted to the above. Both introduced and native organisms interact in multiple and intricate ways, and our understanding of the mechanisms involved is very scant. Further, these interactions are highly dynamic, changing in response to multiple factors, both intrinsic and external. All plants and animals have facilitating and detrimental effects on many other species, and IS are no exception: they favor some components of these extremely complex systems, and are baneful for others (DeVanna et al. 2011; Schlaepfer et al. 2011; Humair et al. 2014; Katsanevakis et al. 2014; Latombe et al. 2019; Vimercati et al. 2020). For example, in the mineral soil layer introduced earthworms increase bacterial biomass, but in the organic layer they decrease it (Ferlian et al. 2018). The golden mussel consumes phytoplankton and can enhance densities of toxic cyanobacteria (Cataldo et al. 2012; Boltovskoy and Correa 2015; Rojas Molina et al. 2015), but, in South America, its larvae and adults are a food resource for at least 50 fish species

(Cataldo 2015; Paolucci and Thuesen 2015). Of the 49 meta-analyses that investigated the impacts of IS on native species and/or the environment (the other 23 compared competitive traits of introduced and native species; Boltovskoy et al. 2020), only 7 found exclusively negative impacts (although mostly based on 1-2 indicators or point estimates), and only 3 concluded that all interactions are non-significant. In contrast, 38 studies arrived at various combinations of neutral and negative impacts, and 13 found some positive effects of IS on the natives.

A salient result of this survey (Boltovskoy et al. 2020) is that more categorical overall conclusions (i.e., overall support, or the lack thereof, for the concept that IS are more fit, perform better, or have negative effects on the natives) were based on significantly lower numbers of estimates than conclusions supporting the concept that IS-native traits and the impacts of IS on natives are mixed and context-dependent. This result indicates that higher numbers of estimates are more likely to yield lower proportions of significant (positive or negative) outcomes. It also supports previous suggestions that as the number of analyses increases, so do the exceptions to the hypotheses proposed and the proportions of conflicting outcomes (Hulme et al. 2013; Crystal-Ornelas and Lockwood 2020a; b).

10. Concluding comments

Disagreements are common in all areas of human activities, and sciences are no exception. However, because sciences are essentially guided by inductive processes and abide by relatively strict rules, presumably less vulnerable to unsubstantiated and subjective perceptions, they have reached consensus on many issues that not long ago were a matter of debate. In fact, debate and discrepancies are a major contributor to these advances, but every new answer poses new questions. Ecology is not an exception. Even in topics devoid of the load of idiosyncratic and emotional components, and researched for centuries, discrepancies persist to this day.

An interesting example is the association between biotic diversity and latitude. In both terrestrial and aquatic environments, the number of species present increases from the poles to the equator. This trend has been analyzed in hundreds of investigations since the XIX century on the basis of millions of data; however, there still is no agreement not only on the drivers of this relationship, but even on its validity for all living creatures (Hillebrand 2004; Brayard et al. 2005; Tittensor et al. 2010; Tittensor and Worm 2016; Kinlock et al. 2018). The most likely explanation for these disagreements is that there is no unique trend and cause-effect relationship (Willig et al. 2003; Boltovskoy and Correa 2017; Grady et al. 2019).

Despite contradicting evidence, debatable issues are repeated time and again as firm facts in research papers, books, and the media. For example, the widespread notion that, on worldwide scales, global biodiversity is decreasing (Barnosky et al. 2011) was recently challenged by a study by Vellend et al. (2013). These authors compiled data on the plants present in 16 thousand continental and insular sites worldwide. They concluded that, for periods ranging between 5 and 261 years, this purported decrease dos not differ significantly from zero. Because the harmful impacts of IS make up the mainstream of invasion biology, it is also conceivable that the conversion of hypothesis into fact through citation alone (Greenberg 2009) permeates much of the literature.

Even ignoring its highly value-laden character, the discipline of biological invasions is also likely unable to find general rules because each biological introduction is a particular case, whose influence on resident species and on the environment depends on factors which are specific to that particular introduction. The aforementioned survey (Boltovskoy et al. 2020) included an estimate of the number of cases where the outcome of an assessment changed in response to the settings of the experiments or field observations involved. These settings covered 12 different categories (e.g., trophic or functional levels, climatic or biogeographic areas, plant growth form - herbs, vines, bushes, trees, different habitats, etc.). In about 40% of the 306 assessments, the result of the comparison changed when the settings varied (usually from significant to non-significant, or vice versa).

Several scholars voiced their concerns that invasion biology is evolving as a discipline independent from ecology in general (Davis and Thompson 2002; Thompson and Davis 2011). Their argument is that all ecosystems have numerically and functionally dominant species (native or introduced) due to intrinsic factors, and that these intrinsic factors are neither static nor universal, but dependent on numerous historical, evolutionary environmental conditions that modulate the ability of these species to compete successfully. Although there indeed are some mechanisms that can favor IS selectively (for example, the absence of co-evolved enemies), these mechanisms are circumstantial and ephemeral (Hawkes 2007; Carlsson and Strayer 2009; Diez et al. 2010; Gioria and Osborne 2014; Anton et al. 2020). In the long run, it is the species' attributes and their interactions that define their success or their failure, rather than geographic origin. Invasion ecology has been labeled as a pseudo-discipline, largely based on, and maintained by the use of a specific jargon. In academia, funding agencies and in the media, this resulted in the perception that the introduction, and occasionally the spectacular success, of IS is a unique process requiring special hypotheses and methods, different from those of ecology in general. However, rather than contributing to our understanding, this divorce between ecology and invasion biology hindered advances in the interpretation of the processes involved in

the introduction of new species (Davis and Thompson 2002; Valéry et al. 2013).

Current knowledge of the impacts of IS leave little doubt that some can be devastating, but also that a large number have no noticeable effects, and usually effects are mixed, with some negative, many non-significant, and some positive. This suggests that management strategies, which are usually costly and complicated, should consider two different situations.

One of them refers to potential IS, but that have not yet been introduced, which has been the subject of numerous modelling assessments (Levine and D'Antonio 2003; Broennimann and Guisan 2008; Jiménez-Valverde et al. 2011; Snyder et al. 2014; Karatayev et al. 2015; Mellin et al. 2016; Kramer et al. 2017; Mackie and Brinsmead 2017; Rinella and Sheley 2017; Tingley et al. 2017; Barbet-Massin et al. 2018; Kvistad et al. 2019; Petsch et al. 2020). The many examples of harmful introductions seem to justify the precautionary principle: avoid introduction, if possible. The fact that by 2015 244 countries subscribed one or more of the 48 international treaties on IS (Turbelin et al. 2017) suggests that, globally, this concern is not absent from the political agendas, even if subsequent compliance actions are often not as efficient as they should (Boltovskoy et al. 2011). However, species introductions can be highly unpredictable. In many cases, it is obviously not easy to predict which species may be successfully introduced at various locations, and when, especially if these introductions are accidental. Furthermore, sometimes IS that, in theory, should thrive in certain new environments fail to establish IS themselves there. Occasionally, are introduced several unsuccessfully, before becoming successfully established, for reasons unknown. On the other hand, IS can sometimes adjust in surprising ways to seemingly unsuitable environments (Guiasu 2016).

One of the widely held arguments supporting these control measures is that they are cheaper and easier to implement than programs aimed at mitigating the damage due to some IS (Simberloff 2020). However, this line of thought is not without pitfalls. If one agrees that infectious diseases, such as the SARS-CoV-2 pandemic, should be included in the roster of IS (Nuñez et al. 2020), it is still unclear whether the financial burdens associated with our attempts to stop its dispersal are lower than the impacts of the virus itself (Sarcodie and Owusu 2020). This is obviously an extreme example because it involves human lives, but it illustrates clearly that precautionary measures are not cheap (Tait and Larson 2018). Ballast water-related introductions, originally fought using relatively inexpensive methods (i.e., the exchange of ballast water in the open ocean and the assessment of compliance through salinity measurements), are being replaced by much more expensive options (installation onboard of ballast water treatment plants and assessment of compliance evaluating the densities of viable organisms left after the

treatment; procedures D1 and D2 of the International Maritime Organization, enforced since 2017).

The second situation is that of already present IS. In this case, the precautionary principle might suggest their eradication, or at least stopping further spread. However, even if eradication were feasible (and often it is not, especially in marine environments: Simberloff 2020), the resources needed are usually very high, programs are often unsuccessful (except on islands and when aimed at large organisms; Cassini 2020) and, because chances that negative impacts will be large are low, these actions are often unnecessary (Stromberg et al. 2009). Further, if the introduction is tens to hundreds of years old, the IS might already be tightly inter-connected with the natives or with other IS, and its elimination can cause unexpected negative consequences (Bergstrom et al. 2009; Hanna and Cardillo 2014; Guiasu 2016; Vizentin-Bugoni et al. 2019; Cassini 2020). In these cases, attempting an assessment of potential negative impact seems the best first option. Unfortunately, such assessments are complicated by the fact that impacts are highly context-dependent, implying that previous information, when available, is of dubious usefulness. Further, the magnitude of the prediction of environmental and socio-economic impacts of invasive species is proportional to their cost, and may often require international research collaborations and capacity building with scientists from high income areas (Measey 2020). The option of doing nothing in the case of a recent introduction is questioned because some IS have a time lag before their populations start growing exponentially, and because introductions that seemed initially harmless showed damage in the long term (Simberloff 2020) (although both the decrease of negative impacts with time since introduction and no change have also been observed; Parker et al. 2013; Závorka et al. 2018). However, these arguments do not seem to suffice for undertaking control or eradication programs for each of the ~600 IS that pop-up each year worldwide (Seebens et al. 2017). Thus, the argument in favor of control measures should probably be inverted, undertaking them (and bearing the costs involved) only when impacts are doubtless and, obviously, more costly that coexisting with the problem. Mitigation methods include total eradication and maintenance management, aimed at keeping the IS at abundance levels compatible with the minimization of damage (Simberloff 2020). Both are usually expensive, but in addition to the initial investment, maintenance management requires permanent costs in order to keep the IS under check. In both cases, these costs are ultimately supported by the society.

As with the human perception of a pristine state of nature, which is subjective and strongly influenced by emotional, ideological, and cultural aspects, eradication also poses ethical problems associated with the extermination of living creatures. From this perspective, killing plants or animals in order to get rid of an IS can engender major social conflicts (Wallach et al. 2018; Cassini 2020; Wallach et al. 2020). Such conflicts are

unlikely if the IS is a pathogen, or a low-visibility species such as most microorganisms, many inconspicuous plants, and most invertebrates. However, with vertebrates, in particular amphibians, reptiles, and most birds and mammals, the situation can be very different. An interesting example is that of the attempts at eradicating, in Italy, the grey squirrel (Sciurus carolinensis), introduced in 1948 from the USA, and which strongly impacted the native red squirrel (Sciurus vulgaris), as well as native trees. The eradication program, started in 1997, had to be halted due to strong opposition by animal rights groups. After 3 years of legal struggles the program was finally abandoned (Genovesi and Bertolino 2001). Further problems are posed by species that were driven to extinction in their native range or parts of it, but were reintroduced using specimens taken elsewhere previously and bred in captivity or in the wild, like the Chinese Père David's deer (Elaphurus davidianus; Zheng et al. 2013; Chebez and Rodríguez 2014), or from populations that survived elsewhere, like the European beaver (Gaywood (Castorfiber) et al. 2008), and many (https://en.wikipedia.org/wiki/Species reintroduction). De-extinction globally extinct species, such as possibly bringing back the woolly mammoth, which goes a major step beyond re-introduction of a living species, is yet another highly debatable issue which does not fit the simple native-alien dichotomy (Novak 2018).

A more holistic and more inclusive view of the disagreements on IS would probably offer better chances of reaching consensus and implementing more fruitful strategies for the interpretation of their effects and finding less costly methods for their management, when deemed necessary (Schlaepfer et al. 2011; Orion 2015; Büscher and Fletcher 2020; Vimercati et al. 2020). In this context, there are two concepts that should be given closer attention.

One of them is that each biological introduction is a unique phenomenon, and so are its consequences. These consequences, in turn, are different for different native species, environments, and human interests (Hattingh 2011; Boltovskoy et al. 2020; Vimercati et al. 2020; Albertson et al. 2021). Generalizations usually contribute little to the adequate understanding of the subject. The impacts of the golden mussel are a case in point of the variety of outcomes brought about by an IS. These impacts can be widely different depending on the native species, community, or process considered (Fig. 12). Further, these effects change in space and time, such that their overall impact is hardly definable, let alone predictable. Human interventions responsible for some of the most dramatic impacts of IS, like the connection of the North Atlantic and the Great Lakes, that allowed the entry of the sea lamprey (along with 187 other IS) in the latter (Sturtevant et al. 2019), have had an enormous positive impact on the economy of Canada and the USA (Martin Associates 2018). In highly invaded New Zealand (Mooney and Hobbs 2000), more than 95% of export earnings are derived from alien species (Ewel et al. 1999). The expansion of the Nile perch population in Lake Victoria boosted fish exports

of Uganda, Kenya, and Tanzania from ~ 25 million US dollars in 1992 to > 300 million in 2005-2008 (overfishing eroded these revenues subsequently; Aloo et al. 2017).

The second issue is the recognition that Earth's nature is highly dynamic, permanently changing, and many (or most) IS are as much a part of the world's ecosystems as the natives, rather than just a baneful and destabilizing component that has to be eliminated by all means (Orion 2015; Pearce 2015; Cassini 2020). It is impractical, and mostly unfeasible, to try to restore ecosystems to some "rightful" historical state (Davis et al. 2011). Furthermore, this is obviously a highly subjective exercise. How far back in time should we go when attempting to reconstruct past environments and why? Comparison of the impacts by IS with those due to other human actions, in particular global warming, deforestation, pollution, over-exploitation, habitat fragmentation, and urbanization is tempting (Vitousek et al. 1997; Goudie and Viles 2003), but misguided. Although all these involve environmental changes and changing living conditions, their impacts are much less debatable and generally more directional than those of IS. Faunal replacements in Oahu (see above) are a clear example of the resilience and adaptation capabilities of the biota to IS (Hubbell 2001: Vizentin-Bugoni et al. 2019). We are not suggesting that efforts to mitigate major problems caused by some introduced species should not be made. As many native species, including crop weeds, parasites or animals whose population growth puts other organisms or human welfare at risk (Goodrich and Buskirk 1995; Hill et al. 2007), harmful IS, in particular those involved in endangering human health (Mazza et al. 2013), should be the object of eradication or control actions. Several viral (smallpox, measles, mumps, rubella, polio, and non-viral (dracunculiasis, filariasis, onchocerciasis) infectious diseases have been almost totally extirpated worldwide, regardless of their geographic origin, and without objections concerning the elimination of species or gene pools.

Acknowledgments

This work was partially funded by ANPCYT-PICT 2015-2598 to DB.

References

Albertson LK, MacDonald MJ, Tumolo BB, Briggs MA, Maguire Z, Quinn S, Sanchez-Ruiz JA, Veneros J, Burkle LA (2021) Uncovering patterns of freshwater positive interactions using meta-analysis: Identifying the roles of common participants, invasive species and environmental context. Ecology Letters, 24:594-607.

Aloo PA, Njiru J, Balirwa JS, Nyamweya CS (2017) Impacts of Nile perch, *Lates niloticus*, introduction on the ecology, economy and conservation of Lake Victoria, East Africa. Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use, 22:320-333.

Anthony L (2017) The aliens among us. How invasive species are transforming the planet - and ourselves. Yale University Press, New Haven (USA, pp. 1-394.

- Anton A, Geraldi NR, Ricciardi A, Dick JTA (2020) Global determinants of prey naiveté to exotic predators. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 287:20192978.
- Arceo-Gómez G, Ashman TL (2016) Invasion status and phylogenetic relatedness predict cost of heterospecific pollen receipt: implications for native biodiversity decline. Journal of Ecology, 104:1003-1008.
- Barbet-Massin M, Rome Q, Villemant C, Courchamp F (2018) Can species distribution models really predict the expansion of invasive species? PLoS One, 13:e0193085.
- Barnosky AD, Matzke N, Tomiya S, Wogan GO, Swartz B, Quental TB, Marshall C, McGuire JL, Lindsey EL, Maguire KC, Mersey B, Ferrer EA (2011) Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? Nature, 471:51-57.
- Barrientos R (2015) Adult sex-ratio distortion in the native European polecat is related to the expansion of the invasive American mink. Biological Conservation, 186:28-34.
- Bauer JT (2011) Invasive species: "back-seat drivers" of ecosystem change? Biological Invasions, 14:1295-1304.
- Bergstrom DM, Lucieer A, Kiefer K, Wasley J, Belbin L, Pedersen TK, Chown SL (2009) Indirect effects of invasive species removal devastate World Heritage Island. Journal of Applied Ecology, 46:73-81
- Blossey B, Nötzold R (1995) Evolution of increased competitive ability in invasive nonindigenous plants: a hypothesis. Journal of Ecology, 83:887-889.
- Boltovskoy D, Almada P, Correa N (2011) Biological invasions: assessment of threat from ballast-water discharge in Patagonian (Argentina) ports. Environmental Science & Policy, 14:578-583.
- Boltovskoy D, Correa N (2015) Ecosystem impacts of the invasive bivalve *Limnoperna fortunei* (golden mussel) in South America. Hydrobiologia, 746:81-95.
- Boltovskoy D, Correa N, Sylvester F, Cataldo D (2015a) Nutrient recycling, phytoplankton grazing, and associated impacts of *Limnoperna fortunei*. In: Boltovskoy D (ed.) *Limnoperna fortunei*: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel, Springer International Publishing, Cham (Switzerland), pp. 153-176.
- Boltovskoy D, Xu M, Nakano D (2015b) Impacts of *Limnoperna fortunei* on man-made structures and control strategies: general overview. In: Boltovskoy D (ed.) *Limnoperna fortunei*: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel, Springer International Publishing, Cham (Switzerland), pp. 375-393.
- Boltovskoy D, Correa N (2017) Planktonic equatorial diversity troughs: fact or artifact? Latitudinal diversity gradients in Radiolaria. Ecology, 98:112-124.
- Boltovskoy D, Sylvester F, Paolucci EM (2018) Invasive species denialism: Sorting out facts, beliefs and definitions. Ecology and Evolution, 8:11190-11198.
- Boltovskoy D, Correa N, Burlakova LE, Karatayev AY, Thuesen EV, Sylvester F, Paolucci EM (2020) Traits and impacts of introduced species: a quantitative review of meta-analyses. Hydrobiologia, DOI: 10.1007/s10750-020-04378-9.
- Bortolus A, Carlton JT, Schwindt E (2015) Reimagining South American coasts: unveiling the hidden invasion history of an iconic ecological engineer. Diversity and Distributions, 21:1267-1283.
- Brayard A, Escarguel G, Bucher H (2005) Latitudinal gradient of taxonomic richness: combined outcome of temperature and geographic mid-domains effects? Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research, 43:178-188.
- Briggs JC (2017) Rise of Invasive species denialism? A response to Russell and Blackburn. Trends in Ecology & Evolution, 32:231-232.
- Broennimann O, Guisan A (2008) Predicting current and future biological invasions: both native and invaded ranges matter. Biology Letters, 4:585-589.
- Brown JH, Sax DF (2004) An essay on some topics concerning invasive species. Austral Ecology, 29:530–536.
- Brown JH, Sax DF (2005) Biological invasions and scientific objectivity: Reply to Cassey et al. (2005). Austral Ecology, 30:481-483.
- Büscher B, Fletcher R (2020) The conservation revolution. radical ideas for saving nature beyond the Anthropocene. Verso, London (UK), pp. 1-195.
- Byers JE, Reichard S, Randall JM, Parker IM, Smith CS, Lonsdale WM, Atkinson IAE, Seastedt TR, Williamson M, Chornesky E, Hayes D (2002) Directing research to reduce the impacts of nonindigenous species. Conservation Biology, 16:630-640.
- $\label{eq:convergence} Canning-Clode\ J\ (ed.)\ (2015)\ Biological\ invasions\ in\ changing\ ecosystems.\ Vectors,\ ecological\ impacts,\ management\ and\ predictions.\ De\ Gruyter,\ Berlin\ (Germany),\ pp.\ 1-434.$
- Carlsson NOL, Strayer DL (2009) Intraspecific variation in the consumption of exotic prey A mechanism that increases biotic resistance against invasive species? Freshwater Biology, 54:2315-2319.
- Carmichael WW (1994) The toxins of Cyanobacteria. Scientific American, 270:78-86.

- Carthey AJ, Banks PB (2012) When does an alien become a native species? A vulnerable native mammal recognizes and responds to its long-term alien predator. PLoS One, 7:e31804.
- Casas G, Scrosati R, Piriz ML (2004) The invasive kelp *Undaria pinnatifida* (Phaeophyceae, Laminariales) reduces native seaweed diversity in Nuevo Gulf (Patagonia, Argentina). Biological Invasions, 6:411-416.
- Cassey P, Delean S, Lockwood JL, Sadowski JS, Blackburn TM (2018) Dissecting the null model for biological invasions: A meta-analysis of the propagule pressure effect. PLOS Biology, 16:e2005987.
- Cassini MH (2020) A review of the critics of invasion biology. Biological Reviews, 95:1467-1478.
- Cataldo D, Vinocur A, O'Farrell I, Paolucci EM, Leites V, Boltovskoy D (2012) The introduced bivalve Limnoperna fortunei boosts Microcystis growth in Salto Grande Reservoir (Argentina): evidence from mesocosm experiments. Hydrobiologia, 680:25-38.
- Cataldo D (2015) Trophic relationships of *Limnoperna fortunei* with adult fishes. In: Boltovskoy D (ed.) *Limnoperna fortunei*: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel, Springer International Publishing, Cham (Switzerland), pp. 231-248.
- Catford JA, Jansson R, Nilsson C (2009) Reducing redundancy in invasion ecology by integrating hypotheses into a single theoretical framework. Diversity and Distributions, 15:22-40.
- Chebez JC, Rodríguez G (2014) La fauna gringa. Fundación de Historia Natural Félix de Azara Vásquez Mazzini Editores, Buenos Aires (Argentina), pp. 1-224.
- Chew MK (2014) A picture worth forty-one words. Charles Elton, introduced species and the 1936 Admiralty map of British Empire shipping. The Journal of Transport History, 35:225-235.
- Clout MN, Williams PA (eds.) (2009) Invasive species management. A handbook of principles and techniques. Oxford University Press, Oxford (UK), pp. 1-308.
- Colautti RI, MacIsaac HJ (2004) A neutral terminology to define 'invasive' species. Diversity and Distributions, 10:135-141.
- Colautti RI, Bailey SA, Overdijk CDA, Amundsen K, MacIsaac HJ (2006a) Characterised and projected costs of nonindigenous species in Canada. Biological Invasions, 8:45–59.
- Colautti RI, Grigorovich IA, MacIsaac HJ (2006b) Propagule pressure: A null model for biological invasions. Biological Invasions, 8:1023-1037.
- Collins SF, Nelson KA, DeBoom CS, Wahl DH (2017) The facilitation of the native bluegill sunfish by the invasive bighead carp. Freshwater Biology, 62:1645-1654.
- Conn DB, Lucy FE, Graczyk TK (2014) Dreissenid mussels as sentinel biomonitors for human and zoonotic pathogens. In: Nalepa TF, Schloesser DW (eds.) Quagga and zebra mussels: biology, impacts, and control. Second edition, CRC Press, Boca Raton (USA), pp. 265-272.
- Correa N, Boltovskoy D (1998) Las invasiones biológicas. Componente ignorado del cambio global. Ciencia e Investigación, 51:4-14.
- Cox GW (2002) Alien species and evolution. The evolutionary ecology of exotic plants, animals, microbes and interacting native species. Island Press, Washington D.C. (USA), pp. 1-393.
- Cox JG, Lima SL (2006) Naivete and an aquatic-terrestrial dichotomy in the effects of introduced predators. Trends in Ecology & Evolution, 21:674-680.
- Crowley S, Hinchliffe S, Redpath S, McDonald R (2017) Disagreement about invasive species does not equate to denialism: A response to Russell and Blackburn. Trends in Ecology & Evolution, 32:228-229.
- Crystal-Ornelas R, Lockwood JL (2020a) The 'known unknowns' of invasive species impact measurement. Biological Invasions, 22:1513-1525.
- Crystal-Ornelas R, Lockwood JL (2020b) Cumulative meta-analysis identifies declining but negative impacts of invasive species on richness after 20 years. Ecology, 101:e03082.
- Cuthbert RN, Bacher S, Blackburn TM, Briski E, Diagne C, Dick JTA, Essl F, Genovesi P, Haubrock PJ, Latombe G, Lenzner B, Meinard Y, Pauchard A, Pyšek P, Ricciardi A, Richardson DM, Russell JC, Simberloff D, Courchamp F (2020) Invasion costs, impacts, and human agency: Response to Sagoff 2020. Conservation Biology, DOI: 10.1111/cobi.13592.
- Daga VS, Olden JD, Gubiani ÉA, Piana PA, Padial AA, Vitule JRS (2020) Scale-dependent patterns of fish faunal homogenization in Neotropical reservoirs. Hydrobiologia, 847:3759-3772.
- Darwin C (1859) On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life. John Murray, London (UK), pp. 1-502.
- David M, Gollasch S (eds.) (2015) Global maritime transport and ballast water management. Issues and solutions. Springer, Dodrecht (Netherlands), pp. 1-306.
- David P, Thébault E, Anneville O, Duyck PF, Chapuis E, Loeuille N (2017) Chapter One Impacts of invasive species on food webs: A review of empirical data. In: Bohan DA, Dumbrell AJ, Massol F (eds.) Networks of Invasion: A Synthesis of Concepts, Elsevier, pp. 1-60.
- Davis MA, Thompson K (2002) "Newcomers" invade the field of invasion ecology: question the field's future. Bulletin of the Ecological Society of America, 83:196–197.

- Davis MA (2006) Invasion biology 1958-2005: the pursuit of science and conservation. In: Cadotte MW, McMahon SM, Fukami T (eds.) Conceptual ecology and invasion biology: reciprocal approaches to nature, Springer, Berlin (Germany), pp. 35-64.
- Davis MA (2009) Invasion biology. Oxford University Press, New York (USA), pp. 1-244.
- Davis MA, Chew MK, Hobbs RJ, Lugo AE, Ewel JJ, Vermeij GJ, Brown JH, Rosenzweig ML, Gardener MR, Carroll SP, Thompson K, Pickett TA, Stromberg JC, Del Tredici P, Suding KN, Ehrenfeld JG, Grime JP, Mascaro J, Briggs JC (2011) Don't judge species on their origins. Nature, 474:153-154
- Davis MA, Chew MK (2017) 'The denialists are coming!' Well, not exactly: A response to Russell and Blackburn. Trends in Ecology & Evolution, 32:229-230.
- Davis MA (2020) Let's welcome a variety of voices to invasion biology. Conservation Biology, DOI: 10.1111/cobi.13608.
- Davis RA, Watson DM (2018) Vagrants as vanguards of range shifts in a dynamic world. Biological Conservation, 224:238-241.
- DeVanna KM, Bodamer BL, Wellington CG, Hammer E, Mayer CM, Bossenbroek JM (2011) An alternative hypothesis to invasional meltdown in the Laurentian Great Lakes region: General facilitation by *Dreissena*. Journal of Great Lakes Research, 37:632-641.
- Dieckmann U, Doebeli M (1999) On the origin of species by sympatric speciation. Nature, 400:354–357. Diez JM, Dickie I, Edwards G, Hulme PE, Sullivan JJ, Duncan RP (2010) Negative soil feedbacks accumulate over time for non-native plant species. Ecology Letters, 13:803-809.
- Dionisio Pires LM, Ibelings BW, van Donk E (2010) Zebra mussels as a potential tool in the restoration of eutrophic shallow lakes, dominated by toxic cyanobacteria. In: van der Velde G, Rajagopal S, Bij de Vaate A (eds.) The Zebra Mussel in Europe, Backhuys Publishers, Leiden (Netherlands), pp. 361–372.
- Doherty TS, Glen AS, Nimmo DG, Ritchie EG, Dickman CR (2016) Invasive predators and global biodiversity loss. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 113:11261-11265.
- Drake DR, Hunt TL (2009) Invasive rodents on islands: integrating historical and contemporary ecology. Biological Invasions, 11:1483-1487.
- Dudgeon D (2020) Freshwater biodiversity: status, threats and conservation. Cambridge University Press, Cambridge (UK), pp. 1-499.
- Elbroch LM, Wittmer HU (2013) The effects of puma prey selection and specialization on less abundant prey in Patagonia. Journal of Mammalogy, 94:259-268.
- Elton CS (1958) The ecology of invasions by animals and plants. Methuen, London (UK), pp. 1-196.
- Enders M, Hütt M-T, Jeschke JM (2018) Drawing a map of invasion biology based on a network of hypotheses. Ecosphere, 9:e02146.
- Enders M, Jeschke JM (2018) A network of invasion hypotheses. In: Jeschke JM, Heger T (eds.) Invasion biology: hypotheses and evidence, CABI, Wallingford (UK), pp. 49–59.
- Essl F, Schindler S, Rabitsch W, van Kleunen M, Vilà M, Richardson DM, Wilson JRU, Bacher S, Genovesi P, Hulme PE, Jeschke JM, Katsanevakis S, Kowarik I, Kühn I, Pyšek P (2018) Which taxa are alien? Criteria, applications, and uncertainties. BioScience, 68:496-509.
- Ewel JJ, O'Dowd DJ, Bergelson J, Daehler CC, D'Antonio CM, Gomez LD, Gordon DR, Hobbs RJ, Holt A, Hopper KR, Hughes CE, LaHart M, Leakey RRB, Lee WJ, Loope LL, Lorence DH, Louda SM, Lugo AE, McEvoy PB, Richardson DM, Vitousek PM (1999) Deliberate introductions of species: Research needs. Benefits can be reaped, but risks are high. BioScience, 49:619-630.
- Ferlian O, Eisenhauer N, Aguirrebengoa M, Camara M, Ramirez-Rojas I, Santos F, Tanalgo K, Thakur MP (2018) Invasive earthworms erode soil biodiversity: A meta-analysis. Journal of Animal Ecology, 87:162-172.
- Fox J (2011) Zombie ideas in ecology. Oikos blog, https://oikosjournal.wordpress.com/2011/06/17/zombie-ideas-in-ecology/
- Frank DM (2019) Disagreement or denialism? "Invasive species denialism" and ethical disagreement in science. Synthese, DOI: 10.1007/s11229-019-02259-w.
- Fritts TH, Rodda GH (1998) The role of introduced species in the degradation of island ecosystems: a case history of Guam. Annual Review of Ecology and Systematics, 29:113-140.
- Gallardo B, Clavero M, Sanchez MI, Vilà M (2016) Global ecological impacts of invasive species in aquatic ecosystems. Global Change Biology, 22:151-163.
- Gaywood M, Batty D, Galbraith C (2008) Reintroducing the European beaver in Britain. British Wildlife, 19:381-391.
- Gbèdomon RC, Salako VK, Schlaepfer M (2020) Diverse views among scientists on non-native species. NeoBiota, 54:49-69.
- Genovesi P, Bertolino S (2001) Human dimension aspects in invasive alien species issues: the case of the failure of the grey squirrel eradication project in Italy. In: McNeely JA (ed.) The great

- reshuffling: Human dimensions of invasive alien species, IUCN, Gland (Switzerland), pp. 113-119.
- Giberto DA, Bremec CS, Schejter L, Schiariti A, Mianzan H, Acha EM (2006) The invasive whelk *Rapana venosa* (Valenciennes 1846): Status and potential ecological impacts in the Rio de la Plata estuary, Argentina-Uruguay. Journal of Shellfish Research, 25:1-6.
- Gilroy JJ, Avery JD, Lockwood JL (2016) Seeking international agreement on what it means to be "native". Conservation Letters, 10:238-247.
- Gioria M, Osborne BA (2014) Resource competition in plant invasions: emerging patterns and research needs. Frontiers in Plant Science, 5:501.
- Golivets M, Wallin KF (2018) Neighbour tolerance, not suppression, provides competitive advantage to non-native plants. Ecology Letters, 21:745-759.
- Goodenough AE (2010) Are the ecological impacts of alien species misrepresented? A review of the "native good, alien bad" philosophy. Community Ecology, 11:13-21.
- Goodrich JM, Buskirk SW (1995) Control of abundant native vertebrates for conservation of endangered species. Conservation Biology, 9:1357-1364.
- Goudie A, Viles H (2003) The Earth transformed. An introduction to human impacts on the environment. Blackwell, Malden (USA), pp. 1-276.
- Grady JM, Maitner BS, Winter AS, Kaschner K, Tittensor DP, Record S, Smith FA, Wilson AM, Dell AI, Zarnetske PL, Wearing HJ, Alfaro B, Brown JH (2019) Metabolic asymmetry and the global diversity of marine predators. Science, 363:eaat4220.
- Greenberg SA (2009) How citation distortions create unfounded authority: analysis of a citation network. British Medical Journal, 339:b2680.
- Guerin GR, Martín-Forés I, Sparrow B, Lowe AJ (2018) The biodiversity impacts of non-native species should not be extrapolated from biased single-species studies. Biodiversity and Conservation, 27:785-790.
- Guerin GR (2019) Invoking denialism does not strengthen invasion science. Biodiversity and Conservation, 28:1939-1941.
- Guiaşu RC (2016) Non-native species and their role in the environment: the need for a broader perspective. Brill, Leiden (The Netherlands), pp. 1-316.
- Guiaşu RC, Tindale CW (2018) Logical fallacies and invasion biology. Biology & Philosophy, 33:34.
- Guiașu RC, Labib M (2021) The unreliable concept of native range as applied to the distribution of the rusty crayfish (*Faxonius rusticus*) in North America. Hydrobiologia, 848:1177-1205.
- Gurevitch J, Koricheva J, Nakagawa S, Stewart G (2018) Meta-analysis and the science of research synthesis. Nature, 555:175-182.
- Hanna E, Cardillo M (2014) Island mammal extinctions are determined by interactive effects of life history, island biogeography and mesopredator suppression. Global Ecology and Biogeography, 23:395-404.
- Hattingh J (2011) Conceptual clarity, scientific rigour and "The stories we are": Engaging with two challenges to the objectivity of invasion biology. In: Richardson DM (ed.) Fifty years of invasion ecology: the legacy of Charles Elton, Wiley-Blackwell, London (England), pp. 359-375.
- Hawkes CV (2007) Are invaders moving targets? The generality and persistence of advantages in size, reproduction, and enemy release in invasive plant species with time since introduction. American Naturalist. 170:832-843.
- Heckenberger MJ, Russel JC, Fausto C, Toney JR, Schmidt MJ, Pereira E, Franchetto B, Kuikuro A (2008) Pre-Columbian urbanism, anthropogenic landscapes, and the future of the Amazon. Science, 321:1214-1217.
- Hierro JL, Maron JL, Callaway RM (2005) A biogeographical approach to plant invasions: the importance of studying exotics in their introduced and native range. Journal of Ecology, 93:5-15.
- Higgins SN, Vander Zanden MJ (2010) What a difference a species makes: a meta-analysis of dreissenid mussel impacts on freshwater ecosystems. Ecological Monographs, 80:179-196.
- Hill NJ, Carbery KA, Deane EM (2007) Human-possum conflict in urban Sydney, Australia: Public perceptions and implications for species management. Human Dimensions of Wildlife, 12:101-113.
- Hillebrand H (2004) On the generality of the latitudinal diversity gradient. The American Naturalist, 163:191-211.
- Hobbs JPA, Frisch AJ, Allen GR, Van Herwerden L (2009) Marine hybrid hotspot at indo-Pacific biogeographic border. Biology Letters, 5
- Hodges KE (2008) Defining the problem: terminology and progress in ecology. Frontiers in Ecology and the Environment, 6:35-42.
- Hoegh-Guldberg O, Hughes L, McIntyre S, Lindenmayer DB, Parmesan C, Possingham HP, Thomas CD (2008) Assisted colonization and rapid climate change. Science, 321:345-346.

- Hoffmann BD, Courchamp F (2016) Biological invasions and natural colonisations: are they that different? NeoBiota, 29:1-14.
- Howard BR, Therriault TW, Côté IM (2017) Contrasting ecological impacts of native and non-native marine crabs: a global meta-analysis. Marine Ecology Progress Series, 577:93-103.
- Hubbell SP (2001) A unified neutral theory of biodiversity and biogeography. Princeton University Press (Princeton, USA), pp. 1-390.
- Huisman J, Matthijs, H.C.P., Visser PM (2005) Harmful cyanobacteria. Springer, Dodrecht (The Netherlands), pp. 1–415.
- Hulme PE, Pysek P, Jarosik V, Pergl J, Schaffner U, Vila M (2013) Bias and error in understanding plant invasion impacts. Trends in Ecology & Evolution, 28:212-218.
- Humair F, Edwards P, Siegrist M, Kueffer C (2014) Understanding misunderstandings in invasion science: why experts don't agree on common concepts and risk assessments. NeoBiota, 20:1-30.
- Irigoyen AJ, Trobbiani G, Sgarlatta MP, Raffo MP (2010) Effects of the alien algae *Undaria pinnatifida* (Phaeophyceae, Laminariales) on the diversity and abundance of benthic macrofauna in Golfo Nuevo (Patagonia, Argentina): potential implications for local food webs. Biological Invasions, 13:1521-1532.
- IUCN (2018) Invasive species. https://www.iucn.org/theme/species/our-work/invasive-species.
- Janzen DH (1981) Enterolobium cyclocarpum seed passage rate and survival in horses, Costa Rican Pleistocene seed dispersal agents. Ecology, 62:593–601.
- Jernelöv A (2017) The long-term fate of invasive species. Aliens forever or integrated immigrants with time? Springer, Cham (Switzerland), pp. 1-296.
- Jeschke J, Gómez Aparicio L, Haider S, Heger T, Lortie C, Pyšek P, Strayer D (2012) Support for major hypotheses in invasion biology is uneven and declining. NeoBiota, 14:1-20.
- Jeschke JM, Bacher S, Blackburn TM, Dick JT, Essl F, Evans T, Gaertner M, Hulme PE, Kuhn I, Mrugala A, Pergl J, Pysek P, Rabitsch W, Ricciardi A, Richardson DM, Sendek A, Vila M, Winter M, Kumschick S (2014) Defining the impact of non-native species. Conservation Biology, 28:1188-1194.
- Jeschke JM, Heger T (eds.) (2018) Invasion Biology. Hypotheses and evidence. CABI, Wallingford (UK), pp. 1-177.
- Jiménez-Valverde A, Peterson AT, Soberón J, Overton JM, Aragón P, Lobo JM (2011) Use of niche models in invasive species risk assessments. Biological Invasions, 13:2785-2797.
- Kalm P (1771) Travels into North America (Volume 3). Cambridge University Press, Cambridge (UK), pp. 1-310.
- Kamenova S, Bartley TJ, Bohan DA, Boutain JR, Colautti RI, Domaizon I, Fontaine C, Lemainque A, Le Viol I, Mollot G, Perga ME, Ravigné V, Massol F (2017) Chapter Three Invasions toolkit: Current methods for tracking the spread and impact of invasive species. In: Bohan DA, Dumbrell AJ, Massol F (eds.) Networks of Invasion: A Synthesis of Concepts. Academic Press, Oxford (UK), pp. 85-182.
- Karatayev AY, Burlakova LE, Mastitsky SE, Padilla DK (2015) Predicting the spread of aquatic invaders: insight from 200 years of invasion by zebra mussels. Ecological Applications, 25:430-440.
- Katsanevakis S, Wallentinus I, Zenetos A, Leppäkoski E, Çinar ME, Oztürk B, Grabowski M, Golani D, Cardoso AC (2014) Impacts of invasive alien marine species on ecosystem services and biodiversity: a pan-European review. Aquatic Invasions, 9:391-423.
- Keane RM, Crawley MJ (2002) Exotic plant invasions and the enemy release hypothesis. Trends in Ecology & Evolution, 17:164-170.
- Keller RB, Lodge DM, Lewis MA, Shogren JF (eds.) (2009) Bioeconomics of invasive species. Integrating ecology, economics, policy, and management. Oxford University Press, New York (USA), pp. 1-298.
- Keller RP, Cadotte MW, Sandiford G (eds.) (2015) Invasive species in a globalized world. Ecological, social, and legal perspectives on policy. The University of Chicago Press, Chicago (USA), pp. 1-410.
- Kinlock NL, Prowant L, Herstoff EM, Foley CM, Akin-Fajiye M, Bender N, Umarani M, Ryu HY, Şen B, Gurevitch J (2018) Explaining global variation in the latitudinal diversity gradient: Meta-analysis confirms known patterns and uncovers new ones. Global Ecology and Biogeography, 27:125-141.
- Kirch PV (2002) On the road of the winds. University of California Press, Berkeley (USA), pp. 1-424.
- Koch PL, Barnosky AD (2006) Late Quaternary extinctions: state of the debate. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 37:215-250.
- Kramer AM, Annis G, Wittmann ME, Chadderton WL, Rutherford ES, Lodge DM, Mason L, Beletsky D, Riseng C, Drake JM (2017) Suitability of Laurentian Great Lakes for invasive species based on global species distribution models and local habitat. Ecosphere, 8:e01883.

- Kuebbing SE, Nuñez MA (2016) Invasive non-native plants have a greater effect on neighbouring natives than other non-natives. Nature Plants, 2:16134.
- Kvistad J, Chadderton WL, Bossenbroek JM (2019) Network centrality as a potential method for prioritizing ports for aquatic invasive species surveillance and response in the Laurentian Great Lakes. Management of Biological Invasions, 10:403-427.
- Larson BMH (2007) An alien approach to invasive species: objectivity and society in invasion biology. Biological Invasions, 9:947-956.
- Latombe G, Canavan S, Hirsch H, Hui C, Kumschick S, Nsikani MM, Potgieter LJ, Robinson TB, Saul WC, Turner SC, Wilson JRU, Yannelli FA, Richardson DM (2019) A four-component classification of uncertainties in biological invasions: implications for management. Ecosphere, 10:e02669.
- Leffler AJ, James JJ, Monaco TA, Sheley RL (2014) A new perspective on trait differences between native and invasive exotic plants. Ecology, 95:298-305.
- Lenoir J, Svenning JC (2015) Climate-related range shifts a global multidimensional synthesis and new research directions. Ecography, 38:15-28.
- Levine JM, D'Antonio CM (2003) Forecasting biological invasions with increasing international trade. Conservation Biology, 17:322-326.
- Lizarralde M (2016) Especies exóticas invasoras (EEI) en Argentina: Categorización de mamíferos invasores y alternativas de manejo. Mastozoología Neotropical, 23:267-277.
- Llanos R, Travaini A (2020) Diet of puma (*Puma concolor*) in sheep ranches of central Patagonia (Argentina). Journal of Arid Environments, 177:104145.
- Lockwood JL, Hoopes MF, Marchetti MP (2007) Invasion ecology. Blackwell, Malden (USA), pp. 1-304. Lundgren EJ, Ramp D, Rowan J, Middleton O, Schowanek SD, Sanisidro O, Carroll SP, Davis M, Sandom CJ, Svenning J-C, Wallach AD (2020) Introduced herbivores restore Late Pleistocene ecological functions. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117:7871.
- MacArthur RH (1970) Species packing and competitive equilibrium for many species. Theoretical Population Biology, 1:1-11.
- MacDougall AS, Turkington R (2005) Are invasive species the drivers or passengers of change in degraded ecosystems? Ecology, 86:42-55.
- Mackie GL, Brinsmead JK (2017) A risk assessment of the golden mussel, *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) for Ontario, Canada. Management of Biological Invasions, 8
- Martin Associates (2018) Economic impacts of maritime shipping in the Great Lakes St. Lawrence region. Lancaster (USA), pp. 1-21 (https://greatlakes-seaway.com/wp-content/uploads/2019/2010/eco_impact_sum.pdf)
- Martin PS (1984) Prehistoric overkill: the global model. In: Martin PS, Klein RG (eds.) Quaternary extinctions a prehistoric revolution, The University of Arizona Press, Tucson (USA), pp. 354-403
- Mazza G, Tricarico E, Genovesi P, Gherardi F (2013) Biological invaders are threats to human health: an overview. Ethology Ecology & Evolution, 26:112-129.
- McKinney ML, Lockwood JL (1999) Biotic homogenization: a few winners replacing many losers in the next mass extinction. Trends in Ecology & Evolution, 14:450-453.
- Measey J, Wagener C, Mohanty NP, Baxter-Gilbert J, Pienaar EF (2020) The cost and complexity of assessing impact. NeoBiota, 62:279-299.
- Mellin C, Lurgi M, Matthews S, MacNeil MA, Caley MJ, Bax N, Przeslawski R, Fordham DA (2016) Forecasting marine invasions under climate change: Biotic interactions and demographic processes matter. Biological Conservation, 204:459-467.
- Merel S, Walker D, Chicana R, Snyder S, Baurès E, Thomas O (2013) State of knowledge and concerns on cyanobacterial blooms and cyanotoxins. Environment International, 59:303-327.
- Mizrahi D, Pereira SF, Navarrete SA, Flores AAV (2017) Allelopathic effects on the sun-coral invasion: facilitation, inhibition and patterns of local biodiversity. Marine Biology, 164:139.
- Moles AT, Flores-Moreno H, Bonser SP, Warton DI, Helm A, Warman L, Eldridge DJ, Jurado E, Hemmings FA, Reich PB, Cavender-Bares J, Seabloom EW, Mayfield MM, Sheil D, Djietror JC, Peri PL, Enrico L, Cabido MR, Setterfield SA, Lehmann CER, Thomson FJ (2012) Invasions: the trail behind, the path ahead, and a test of a disturbing idea. Journal of Ecology, 100:116-127.
- Montero-Castaño A, Vilà M (2012) Impact of landscape alteration and invasions on pollinators: a metaanalysis. Journal of Ecology, 100:884-893.
- Mooney HA, Hobbs RJ (eds.) (2000) Invasive species in a changing world. Island Press, Washington, D.C. (USA), pp. 1-384.
- Mora C, Tittensor DP, Adl S, Simpson AG, Worm B (2011) How many species are there on Earth and in the ocean? PLoS Biol, 9:e1001127.
- Mortensen HS, Dupont YL (2008) Snake in paradise: Disturbance of plant reproduction following extirpation of bird flower-visitors on Guam. Biological Conservation, 141:2146-2154.

- Mueck L (2013) Report the awful truth! Nature Nanotechnology, 8:693-695.
- Munro D, Steer J, Linklater W (2019) On allegations of invasive species denialism. Conservation Biology, 33:797-802.
- Muthukrishnan R, Larkin DJ (2020) Invasive species and biotic homogenization in temperate aquatic plant communities. Global Ecology and Biogeography, 29:656-667.
- Nackley LL, West AG, Skowno AL, Bond WJ (2017) The nebulous ecology of native invasions. Trends in Ecology & Evolution, 32:814-824.
- Nalepa TF, Schloesser DW (eds.) (2014) Quagga and zebra mussels: biology, impacts, and control. Second Edition. CRC Press, Boca Raton (USA), pp. 1-815.
- Nentwig W (ed.) (2008) Biological Invasions. Springer, Berlin (Germany), pp. 1-441.
- Novak BJ (2018) De-Extinction. Genes, 9:548.
- Nuñez MA, Pauchard A, Ricciardi A (2020) Invasion science and the global spread of SARS-CoV-2. Trends in Ecology & Evolution, 35:642-645.
- Nunn N, Qian N (2010) The Columbian Exchange: A history of disease, food, and ideas. Journal of Economic Perspectives, 24:163-188.
- O'Farrell I, Motta C, Forastier M, Polla W, Otano S, Meichtry N, Devercelli M, Lombardo R (2019) Ecological meta-analysis of bloom-forming planktonic Cyanobacteria in Argentina. Harmful Algae, 83:1-13.
- Olenin SN (2017) The study of biological invasions in marine ecosystems during the period of shifts in research paradigms. Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki, 159:510-520.
- Orion T (2015) Beyond the war on invasive species: A permaculture approach to ecosystem restoration. Chelsea Green Publishing, White River Junction (USA), pp. 1-265.
- Orth DJ, Schmitt JD, Hilling CD (2020) Hyperbole, simile, metaphor, and invasivore: Messaging about non-native blue catfish expansion. Fisheries Magazine, DOI: 10.1002/fsh.10502.
- Paolucci EM, Thuesen EV (2015) Trophic relationships of *Limnoperna fortunei* with larval fishes. In: Boltovskoy D (ed.) *Limnoperna fortunei*: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel, Springer, Cham (Switzerland), pp. 211-229.
- Parker JD, Torchin ME, Hufbauer RA, Lemoine NP, Alba C, Blumenthal DM, Bossdorf O, Byers JE, Dunn AM, Heckman RW, Hejda M, Jarošík V, Kanarek AR, Martin LB, Perkins SE, Pyšek P, Schierenbeck K, Schlöder C, van Klinken R, Vaughn KJ, Williams WT, Wolfe LM (2013) Do invasive species perform better in their new ranges? Ecology, 94:985-994.
- Pascal M (2011) Rats. In: Simberloff D, Rejmánek M (eds.) Encyclopedia of biological invasions, University of California Press, Berkeley (USA), pp. 571-575.
- Pearce F (2015) The new wild. Why invasive species will be nature's salvation. Beacon Press, Boston (USA), pp. 1-272.
- Penchaszadeh PE (ed.) (2005) Invasores. Invertebrados bentónicos introducidos en el Río de la Plata y región costera marina aledaña. Eudeba, Buenos Aires (Argentina), pp. 1-384.
- Peoples BK, Davis AJS, Midway SR, Olden JD, Stoczynski L (2020) Landscape-scale drivers of fish faunal homogenization and differentiation in the eastern United States. Hydrobiologia, 847:3727-3741.
- Pereyra PJ (2016) Revisiting the use of the invasive species concept: An empirical approach. Austral Ecology, 41:519-528.
- Pereyra PJ (2020) Rethinking the native range concept. Conservation Biology, 34:373-377.
- Periago ME, Tamburini DM, Ojeda RA, Cáceres DM, Díaz S (2017) Combining ecological aspects and local knowledge for the conservation of two native mammals in the Gran Chaco. Journal of Arid Environments, 147:54-62.
- Perrings C, Williamson M, Dalmazzone S (eds.) (2001) The economics of biological invasions. Edward Elgar, Northampton (USA), pp. 1-248.
- Petsch DK, dos Santos Ribas LG, Mantovano T, Marques Pulzatto M, Teixeira Alves A, Pinha GD, Thomaz SM (2020) Invasive potential of golden and zebra mussels in present and future climatic scenarios in the New World. Hydrobiologia, DOI: 10.1007/s10750-020-04412-w.
- Pimentel D (ed.) (2002) Biological invasions. Economic and environmental costs of alien plant, animal, and microbe species. CRC Press, Boca Raton (USA), pp. 1-369.
- Pimentel D, Zuniga R, Morrison D (2005) Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. Ecological Economics, 52:273-288.
- Pimentel D (ed.) (2011) Biological invasions. Economic and environmental costs of alien plant, animal, and microbe species (Second edition). CRC Press, Boca Raton (USA), pp. 1-449.
- Pizzolón L, Tracanna B, Prosperi C, Guerrero JM (1999) Cyanobacterial blooms in Argentinean inland waters. Lakes & Reservoirs: Research and Management, 4:101-105.
- Ponting C (2007) A new green history of the world. Penguin Books, New York (USA), pp. 1-452.

- Potgieter LJ, Gaertner M, Kueffer C, Larson BMH, Livingstone SW, O'Farrell PJ, Richardson DM (2017) Alien plants as mediators of ecosystem services and disservices in urban systems: a global review. Biological Invasions, 19:3571-3588.
- Preston CD, Pearman DA, Hall AR (2004) Archaeophytes in Britain. Botanical Journal of the Linnean Society, 145:257-294.
- Pysek P, Richardson DM, Pergl J, Jarosik V, Sixtova Z, Weber E (2008) Geographical and taxonomic biases in invasion ecology. Trends in Ecology & Evolution, 23:237-244.
- Quinteros C-P, Bava J-O, Gobbi M-E, Defossé G-E (2017) Guanaco's diet and forage preferences in *Nothofagus* forest environments of Tierra del Fuego, Argentina. Forest Systems, 26:e004.
- Radville L, Gonda-King L, Gómez S, Kaplan I, Preisser Evan L (2014) Are exotic herbivores better competitors? A meta-analysis. Ecology, 95:30-36.
- Rahel FJ (2007) Biogeographic barriers, connectivity and homogenization of freshwater faunas: it's a small world after all. Freshwater Biology, 52:696-710.
- Rastogi RP, Madamwar D, Incharoensakdi A (2015) Bloom dynamics of Cyanobacteria and their toxins: Environmental health impacts and mitigation strategies. Frontiers in Microbiology, 6:10.3389/fmicb.2015.01254.
- Reed-Andersen T, Carpenter SR, Padilla DK, Lathrop RC (2000) Predicted impact of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) invasion on water clarity in Lake Mendota. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 57:1617-1626.
- Ricciardi A, MacIsaac HJ (2008) The book that began invasion ecology. Nature, 452:34.
- Ricciardi A, Hoopes MF, Marchetti MP, Lockwood JL (2013) Progress toward understanding the ecological impacts of nonnative species. Ecological Monographs, 83:263-282.
- Ricciardi A, Ryan R (2018a) Invasive species denialism revisited: response to Sagoff. Biological Invasions, 20:2731-2738.
- Ricciardi A, Ryan R (2018b) The exponential growth of invasive species denialism. Biological Invasions, 20:549-553.
- Richardson DM, Pysek P, Rejmanek M, Barbour MG, Panetta FD, West CJ (2000) Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. Diversity and Distributions, 6:93-107.
- Richardson DM, Pysek P (2008) Fifty years of invasion ecology the legacy of Charles Elton. Diversity and Distributions, 14:161–168.
- Richardson DM, Ricciardi A (2013) Misleading criticisms of invasion science: a field guide. Diversity and Distributions, 19:1461-1467.
- Rilov G, Crooks JA (eds.) (2009) Biological invasions in marine ecosystems. Ecological, management, and geographic perspectives. Springer, Berlin (Germany), pp. 1-641.
- Rinella MJ, Sheley RL (2017) A model for predicting invasive weed and grass dynamics. I. Model development. Weed Science, 53:586-593.
- Rojas Molina F, José de Paggi S, Paggi JC (2015) Impacts of *Limnoperna fortunei* on zooplankton. In: Boltovskoy D (ed.) *Limnoperna fortunei*: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel, Springer, Cham (Switzerland), pp. 177-190.
- Rosenzweig ML (2001) The four questions: What does the introduction of exotic species do to diversity? Evolutionary Ecology Research, 3:361–367.
- Russell JC, Blackburn TM (2017a) Invasive alien species: Denialism, disagreement, definitions, and dialogue. Trends in Ecology & Evolution, 32:312-314.
- Russell JC, Blackburn TM (2017b) The rise of invasive species denialism. Trends in Ecology & Evolution, 32:3-6.
- Sagoff M (2018) Invasive species denialism: a reply to Ricciardi and Ryan. Biological Invasions, 20:2723-2729.
- Sagoff M (2019) Fact and value in invasion biology. Conservation Biology, 34:581-588.
- Salo P, Korpimaki E, Banks PB, Nordstrom M, Dickman CR (2007) Alien predators are more dangerous than native predators to prey populations. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 274:1237-1243.
- Sarkodie SA, Owusu PA (2020) Global assessment of environment, health and economic impact of the novel coronavirus (COVID-19). Environment, Development and Sustainability, DOI: 10.1007/s10668-020-00801-2:1-11.
- Schlaepfer MA, Sax DF, Olden JD (2011) The potential conservation value of non-native species. Conservation Biology, 25:428-437.
- Schwindt E, Carlton J, Orensanz J, Scarabino F, Bortolus A (2020) Past and future of the marine bioinvasions along the Southwestern Atlantic. Aquatic Invasions, 15:11-29.
- Seebens H, Blackburn TM, Dyer EE, Genovesi P, Hulme PE, Jeschke JM, Pagad S, Pysek P, Winter M, Arianoutsou M, Bacher S, Blasius B, Brundu G, Capinha C, Celesti-Grapow L, Dawson W, Dullinger S, Fuentes N, Jager H, Kartesz J, Kenis M, Kreft H, Kuhn I, Lenzner B, Liebhold A, Mosena A, Moser D, Nishino M, Pearman D, Pergl J, Rabitsch W, Rojas-Sandoval J, Roques A,

- Rorke S, Rossinelli S, Roy HE, Scalera R, Schindler S, Stajerova K, Tokarska-Guzik B, van Kleunen M, Walker K, Weigelt P, Yamanaka T, Essl F (2017) No saturation in the accumulation of alien species worldwide. Nature Communications, 8:1-9.
- Silknetter S, Creed RP, Brown BL, Frimpong EA, Skelton J, Peoples BK (2020) Positive biotic interactions in freshwaters: A review and research directive. Freshwater Biology, 65:811-832.
- Simberloff D, Von Holle B (1999) Positive interactions of nonindigenous species: invasional meltdown? Biological Invasions, 1:21-32.
- Simberloff D, Alexander J, Allendorf F, Aronson J, Antunes PM, Bacher S, Bardgett R, Bertolino S, Bishop M, Blackburn TM, Blakeslee A, Blumenthal D, Bortolus A, Buckley GR, Buckley Y, Byers J, Callaway RM, Campbell F, Campbell K, Campbell M, Carlton JT, Cassey P, Catford J, Celesti-Grapow L, Chapman J, Clark P, Clewell A, Canning Clode J, Chang A, Chytrý M, Clout M, Cohen A, Cowan P, Cowie RH, Crall AW, Crooks J, Deveney M, Dixon K, Dobbs FC, Duffy DC, Duncan R, Ehrlich PR, Eldredge L, Evenhuis N, Fausch KD, Feldhaar H, Firn J, Fowler A, Galil B, Garcia-Berthou E, Geller J, Genovesi P, Gerber E, Gherardi F, Gollasch S, Gordon D, Graham J, Gribben P, Griffen B, Grosholz ED, Hewitt C, Hierro JL, Hulme P, Hutchings P, Jarošík V, Jeschke JM, Johnson C, Johnson L, Johnston EL, Jones CG, Keller R, King CM, Knols BGJ, Kollmann J, Kompas T, Kotanen PM, Kowarik I, Kühn I, Kumschick S, Leung B, Liebhold A, MacIsaac H, Mack R, McCullough DG, McDonald R, Merritt DM, Meyerson L, Minchin D, Mooney HA, Morisette JT, Moyle P, Müller-Schärer H, Murray BR, Nehring S, Nelson W, Nentwig W, Novak SJ, Occhipinti A, Ojaveer H, Osborne B, Ostfeld RS, Parker J, Pederson J, Pergl J, Phillips ML, Pyšek P, Rejmánek M, Ricciardi A, Riccita C, Richardson D, Rilov G, Ritchie E, Robertson PA, Roman J, Ruiz G, Schaefer H, Schaffelke B, Schierenbeck KA, Schmitz DC, Schwindt E, Seeb J, Smith LD, Smith GF, Stohlgren T, Strayer DL, Strong D, Sutherland WJ, Therriault T, Thuiller W, Torchin M, van der Putten W, Vilà M, Von Holle B, Wallentinus I, Wardle D, Williamson M, Wilson J, Winter M, Wolfe LM, Wright J, Wonham M, Zabin C (2011) Non-natives: 141 scientists object. Nature, 475:36.
- Simberloff D, Rejmanek M (eds.) (2011) Encyclopedia of biological Invasions. University of California Press, Berkeley (USA), pp. 1-765.
- Simberloff D (2020) Eradication and maintenance management of established aquatic invaders. Hydrobiologia, DOI: 10.1007/s10750-020-04352-5.
- Snyder RJ, Burlakova LE, Karatayev AY, MacNeill DB (2014) Updated invasion risk assessment for Ponto-Caspian fishes to the Great Lakes. Journal of Great Lakes Research, 40:360-369.
- Soorae PS (ed.) (2018) Global reintroduction perspectives: 2018. Case studies from around the globe. IUCN/SSC Reintroduction Specialist Group, Gland, Switzerland and Environment Agency, Abu Dhabi, UAE, Gland (Switzerland), pp. 1-286.
- Sorte CJB, Williams SL, Carlton JT (2010) Marine range shifts and species introductions: comparative spread rates and community impacts. Global Ecology and Biogeography, 19:303-316.
- Stigall AL (2019) The invasion hierarchy: Ecological and evolutionary consequences of invasions in the fossil record. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 50:355-380.
- Stromberg JC, Chew MK, Nagler PL, Glenn EP (2009) Changing perceptions of change: The role of scientists in *Tamarix* and river management. Restoration Ecology, 17:177-186.
- Sturtevant RA, Mason DM, Rutherford ES, Elgin A, Lower E, Martinez F (2019) Recent history of nonindigenous species in the Laurentian Great Lakes; An update to Mills et al., 1993 (25 years later). Journal of Great Lakes Research, 45:1011-1035.
- Suárez-Jiménez R, Hepburn CD, Hyndes GA, McLeod RJ, Taylor RB, Hurd CL (2017) The invasive kelp *Undaria pinnatifida* hosts an epifaunal assemblage similar to native seaweeds with comparable morphologies. Marine Ecology Progress Series, 582:45-55.
- Sumner DA (ed.) (2003) Diseases. Biology and economics for biosecurity. Iowa State Press, Iowa (USA), pp. 1-265.
- Sylvester F, Boltovskoy D, Cataldo D (2007) Fast response of freshwater consumers to a new trophic resource: Predation on the recently introduced Asian bivalve *Limnoperna fortunei* in the lower Paraná River, South America. Austral Ecology, 32:403-415.
- Tait M, Larson BMH (2018) Entropy and the conceit of biodiversity management. Global Ecology and Biogeography, 27:642-646.
- Thompson JN (2005) The geographic mosaic of coevolution. The University of Chicago Press, Chicago (USA), pp. 1-400.
- Thompson K, Davis MA (2011) Why research on traits of invasive plants tells us very little. Trends in Ecology & Evolution, 26:155-156.
- Thompson K (2014) Where do camels belong? Why invasive species aren't all bad. Profile Books, London (UK), pp. 1-262.

- Thomsen MS, Byers JE, Schiel DR, Bruno JF, Olden JD, Wernberg T, Silliman BR (2014) Impacts of marine invaders on biodiversity depend on trophic position and functional similarity. Marine Ecology Progress Series, 495:39-47.
- Thomsen MS, Wernberg T, Schiel D (2015) 10. Invasions by non-indigenous species. In: Crowe TP, Frid CLJ (eds.) Marine ecosystems: Human impacts on biodiversity, functioning and services, Cambridge University Press, Cambridge (UK), pp. 274-331.
- Tingley R, García Díaz P, Arantes CRR, Cassey P (2017) Integrating transport pressure data and species distribution models to estimate invasion risk for alien stowaways. Ecography, 41:635-646.
- Tittensor DP, Mora C, Jetz W, Lotze HK, Ricard D, Berghe EV, Worm B (2010) Global patterns and predictors of marine biodiversity across taxa. Nature, 466:1098-1101.
- Tittensor DP, Worm B (2016) A neutral-metabolic theory of latitudinal biodiversity. Global Ecology and Biogeography, 25:630-641.
- Turbelin AJ, Malamud BD, Francis RA, Sykes M (2017) Mapping the global state of invasive alien species: patterns of invasion and policy responses. Global Ecology and Biogeography, 26:78-92.
- Valéry L, Fritz H, Lefeuvre J-C (2013) Another call for the end of invasion biology. Oikos, 122:1143-
- van der Wal R, Fischer A, Selge S, Larson B (2015) Neither the public nor experts judge species primarily on their origins. Environmental Conservation, 42:349–355.
- van Gremberghe I, Leliaert F, Mergeay J, Vanormelingen P, Van der Gucht K, Debeer A-E, Lacerot G, De Meester L, Vyverman W (2011) Lack of phylogeographic structure in the freshwater cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* suggests global dispersal. PLoS One, 6:e19561.
- van Hengstum T, Hooftman DAP, Oostermeijer JGB, van Tienderen PH, Mack R (2014) Impact of plant invasions on local arthropod communities: a meta-analysis. Journal of Ecology, 102:4-11.
- Vellend M, Baeten L, Myers-Smith IH, Elmendorf SC, Beauséjour R, Brown CD, De Frenne P, Verheyen K, Wipf S (2013) Global meta-analysis reveals no net change in local-scale plant biodiversity over time. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110:19456–19459.
- Vilà M, Pujadas J (2001) Land-use and socio-economic correlates of plant invasions in European and North African countries. Biological Conservation, 100:397-401.
- Vilà M, Hulme PH (eds.) (2017) Impact of biological invasions on ecosystem services. Springer, Cham (Switzerland), pp. 1-354.
- Vimercati G, Kumschick S, Probert AF, Volery L, Bacher S (2020) The importance of assessing positive and beneficial impacts of alien species. NeoBiota, 62:525-545.
- Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J, Melillo JA (1997) Human domination of Earth's ecosystems. Science, 277:494-499.
- Vizentin-Bugoni J, Tarwater CE, Foster JT, Drake DR, Gleditsch JM, Hruska AM, Kelley JP, Sperry JH (2019) Structure, spatial dynamics, and stability of novel seed dispersal mutualistic networks in Hawai'i. Science, 364:78-82.
- Wallach AD, Bekoff M, Batavia C, Nelson MP, Ramp D (2018) Summoning compassion to address the challenges of conservation. Conservation Biology, 32:1255-1265.
- Wallach AD, Lundgren E, Batavia C, Nelson MP, Yanco E, Linklater WL, Carroll SP, Celermajer D, Brandis KJ, Steer J, Ramp D (2020) When all life counts in conservation. Conservation Biology, 34:997-1007.
- Walsh JR, Carpenter SR, Vander Zanden MJ (2016) Invasive species triggers a massive loss of ecosystem services through a trophic cascade. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 113:4081-4085.
- Warren RJ, King JR, Tarsa C, Haas B, Henderson J (2017) A systematic review of context bias in invasion biology. PLoS One, 12:e0182502.
- Webber BL, Scott JK (2012) Rapid global change: implications for defining natives and aliens. Global Ecology and Biogeography, 21:305-311.
- Wilcox CP, Turpin RB (eds.) (2009) Invasive species: Detection, impact and control. Nova, New York (USA), pp. 1-217.
- Williamson M, Brown KC (1986) The analysis and modelling of British invasions. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 314:505-522.
- Willig MR, Kaufman DM, Stevens RD (2003) Latitudinal gradients of biodiversity: Pattern, process, scale, and synthesis. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 34:273-309.
- Willis KJ, Birks HJB (2006) What is natural? The need for a long-term value of non-native species. Conservation Biology, 25:428-437.
- Yoon S, Read Q (2016) Consequences of exotic host use: impacts on Lepidoptera and a test of the ecological trap hypothesis. Oecologia, 181:985-996.
- Závorka L, Buoro M, Cucherousset J (2018) The negative ecological impacts of a globally introduced species decrease with time since introduction. Global Change Biology, 24:4428-4437.

- Zheng W, Beauchamp G, Jiang X, Li Z, Yang Q (2013) Determinants of vigilance in a reintroduced population of Père David's deer. Current Zoology, 59:265-270.
- Zwerschke N, Eagling L, Roberts D, O'Connor N (2020) Can an invasive species compensate for the loss of a declining native species? Functional similarity of native and introduced oysters. Marine Environmental Research, 153:104793.

INSTRUCCIONES PARA AUTORES

La publicación de artículos científicos en los Anales de la ANCEFN está abierta a la comunidad científica nacional e internacional sin costo alguno.

Las Contribuciones Científicas están destinadas a la publicación de trabajos de investigación originales y revisiones en todos los temas de interés de la Academia (matemática, física, astronomía, química, ingeniería y tecnología, ciencias de la tierra y biología).

A partir del volumen 67 (2015), los Anales se editan solamente en versión electrónica. El manuscrito original debe ser enviado por correo electrónico a la dirección: biblio@ancefn.org.ar

CONTENIDO Y ESTILO

Se recomienda tener en cuenta que el auditorio de los Anales de la ANCEFN es muy amplio, y por ende incluye muchos lectores que no son especialistas en los temas de los artículos. Por lo tanto, es conveniente procurar que éstos sean accesibles a un espectro heterogéneo, cubriendo adecuadamente la explicación general de los aspectos más específicos de cada disciplina o tema tratado. Si bien se respetará el estilo de cada autor, se deberá tener presente que en los artículos científicos la precisión es mucho más importante que la elegancia de la prosa.

Como es usual, se recomienda subdividir el trabajo en secciones (Introducción, Materiales y Métodos, Resultados, Discusión, Agradecimientos, Referencias bibliográficas) y, en páginas separadas, los Epígrafes de Tablas y Figuras.

EXTENSIÓN

La extensión no está limitada, pero se recomienda que los trabajos no excedan de 20.000 palabras (incluyendo referencias y epígrafes).

IDIOMA

Los trabajos podrán ser presentados en español o en inglés.

PRESENTACIÓN DEL TEXTO

El texto original deberá prepararse utilizando el procesador Word (para PC), en tamaño de hoja A4. Se utilizará letra tipo Century Schoolbook y cuerpo 12, con espaciado simple entre renglones.

TÍTULO, AUTORES, DIRECCIONES Y RESÚMENES

En la primera página, de acuerdo al siguiente detalle:

(1) El título del trabajo integramente en **MAYÚSCULAS NEGRITAS**, cuerpo de letra 14, centrado en la hoja, y sin punto final;

- (2) El nombre del o los autores (nombres y apellido completos) en *itálicas* mayúscula/minúscula. En casos donde haya más un autor, cada nombre irá seguido por un superíndice numérico que identifique su lugar de trabajo. El autor de correspondencia se indicará con un asterisco;
- (3) La o las direcciones de los lugares de trabajo del o los autores, precedidos por el superíndice indicado en (2);
- (4) Si hubiera más de un autor, un asterisco (ver 2) y el correo electrónico correspondiente.
- (5) Resúmenes. A continuación deberá incluirse el resumen en español, y el resumen (*Abstract*) en inglés, ambos seguidos de de 3 a 7 palabras clave (*keywords*). Los trabajos en inglés llevarán primero el resumen en ese idioma, y luego el resumen en castellano precedido por el título, también en castellano. Los resúmenes no deberán exceder las 500 palabras (aprox. 3000 caracteres, con espacios) y constarán de un párrafo único, sin referencias bibliográficas.

Ejemplo (en lo sucesivo, los ejemplos están destacados con fondo grisado).

IMPACTOS DE LA CONTAMINACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO DE LA PLATA

José M. del Prado^{1,2*}, Valeria Gómez^{2,3}, Juan P. Ingenieros⁴

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

²IEGEBA, Instituto de Ecología, Genética y Evolución, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad de Buenos Aires, Intendente Güiraldes 2160, Pabellón 2, Ciudad Universitaria, 1428 Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

³Servicio de Hidrografía Naval, Av. Montes de Oca 2124, 1271 Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, Argentina

⁴Museo Argentino de Ciencias Naturales - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Av. Angel Gallardo 470, 1405 Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, Argentina

*Autor de correspondencia: delprado@gl.fcen.uba.ar

Resumen

La Cuenca del Río de la Plata sufre los efectos de la contaminación de numerosas...

Palabras clave: Contaminación, Polución, agua dulce...

Abstract

Impacts of pollution by heavy metals in the Río de la Plata basin. The Río de la Plata basin is subject to pollution impacts from many

sources...

Keywords: Pollution, Río de la Plata, freshwater...

Texto

Los subtítulos serán numerados comenzando por la Introducción e indicando los niveles correspondientes. Por ejemplo:

- 1. Introducción
- 2. Material y métodos
- 2.1. Trabajo de campo
- 2.2. Técnicas de laborario
- 3. Resultados
- 3.1. Tipos de contaminantes
- 3.1.1. Metales pesados
- 3.1.2. Pesticidas
- 3.2. Distribución geográfica de los contaminantes
- 3.3. Niveles de contaminación
- 3.4. Relaciones entre contaminación y urbanización
- 4. Discusión
- 4.1. Tipos de contaminantes

Agradecimientos

Referencias

FIGURAS

Son todos los materiales gráficos (dibujos, diagramas, gráficos, mapas, fotografías, blanco y negro, grises o color) utilizados para ilustrar el texto. Serán numeradas correlativamente con números arábigos de acuerdo a su mención en el texto (como "Fig. 1, Fig. 2" etc. o, si incluyen varias imágenes complementarias en la misma figura, "Fig. 1A, Fig. 2C", etc. Cada una debe contar con un epígrafe conciso pero suficiente para interpretar la imagen sin necesidad de recurrir al texto. Se presentarán en archivos independientes identificados abreviadamente con primer autor y número de figura (por ejemplo, "del Prado Fig 1.EPS". En el archivo del texto se indicará (utilizando un color de letra diferente o sombreado) la posición aproximada donde debe ser ubicada la figura o correspondiente.

Los originales de las figuras utilizadas pueden estar en dos formatos diferentes: imágenes rasterizadas o bitmaps (generalmente fotos), o imágenes vectorizadas (gráficos de líneas, curvas, histogramas, etc.). En ambos casos, deberán ser presentadas en formato EPS (Encapsulated PostScript). Los bitmaps originales (antes de ser convertidos a EPS) deben estar en una resolución mínima de 300 ppp (puntos por pulgada, o dpi - dots per inch) para asegurar una calidad y legibilidad adecuadas (esta resolución debe ser la utilizada en el momento de generar la imagen; una imagen obtenida a 70 ppp puede ser convertida 300 ppp, pero ello no mejorará su resolución). Al generar los bitmaps originales (como fotos), se debe utilizar el formato TIF (no JPG o JPEG, ya que éstos pueden reducir muy sensiblemente la calidad). El tamaño del texto en las figuras no debe ser inferior a 5 puntos (teniendo en cuenta que algunas pueden ser reducidas para adecuarse al ancho y/o altura de la página (aprox. 160 x 215 mm).

Para los rótulos en las figuras se debe utilizar una fuente sin serif (e.g., Arial).

Los epígrafes estarán en letra tipo Century Schoolbook y cuerpo 9, centrados y con espaciado simple entre renglones. Por ejemplo:

Fig. 1. Datos de ozono versus temperatura

TABLAS

Al igual que las figuras, deben ser numeradas correlativamente con números arábigos de acuerdo a su mención en el texto (Tabla 1, Tabla 2, etc.). Serán presentadas en archivos independientes identificados y aclarando su posición en el texto como se detallara para las figuras.

MULTIMEDIA, ANIMACIONES Y OTROS RECURSOS

Los autores pueden incluir enlaces externos a figuras, bases de datos, animaciones, etc. sean de utilidad para ilustrar el texto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EN EL TEXTO

Se usará el formato de autor-año. Por ejemplo:

- "... cobre en altas concentraciones (Gómez 2008)."
- "... cobre en altas concentraciones (Gómez y Pérez 2009)." [o "Gómez and Pérez 2009", en los trabajos en inglés].

"Según Gómez (2008), el cobre..."

Cuando se trate de más de dos autores, se utilizará el apellido del primero seguido por "et al.":

"... cobre en altas concentraciones (Gómez et al. 2004)."

Los trabajos diferentes del mismo autor/es y año se diferenciarán con una letra a continuación del año:

"... cobre en altas concentraciones (Gómez et al. 2004a), aunque esta tendencia puede ser variable (Gómez et al. 2004b)."

Las citas consecutivas se separarán con punto y coma:

"... cobre en altas concentraciones (Gómez 2008; Gómez y Pérez 2009)."

En el texto, el ordenamiento de las citas será por año (ascendente), y, en caso de años iguales, por apellido del primer, primero y segundo, etc. autor (ascendente).

EN LA BIBLIOGRAFÍA (Referencias)

A continuación se dan ejemplos de formato de referencias para diferentes fuentes. Por favor, prestar atención al uso de los signos de puntuación.

Artículos en revistas

En las revistas con versión electrónica solamente, los trabajos suelen carecer de paginación, en estos casos, a continuación del volumen se utilizará el identificador provisto por la revista o el DOI. En los trabajos ya aceptados pero aún no paginados e incluidos en un volumen impreso o digital, las páginas (o volumen y páginas) serán reemplazados por el DOI correspondiente.

Belanger SE, Cherry DS, Farris JL, Sappington KG, Cairns J (1991)

Sensitivity of the Asiatic clam to various biocidal control agents.

Journal of the American Water Works Association, 83:79-87.

Cassini MH, Túnez JI (2019) Situación ambiental del Bajo Delta del Paraná: ¿Qué opinan los pobladores? Ecología Austral, 29:296-305.

Mora C, Tittensor DP, Adl S, Simpson AG, Worm B (2011) How many species are there on Earth and in the ocean? PLoS Biology, 9:e1001127.

Meloni M, Correa N, Pitombo FB, Chiesa IL, Doti B, Elías R, Genzano G, Giachetti CB, Giménez D, López-Gappa J, Pastor C, Wandeness AP, Ramírez FC, Roccatagliata D, Schulze-Sylvester M, Tatián M, Zelaya DG, Sylvester F (2020) In-water and dry-dock hull fouling assessments reveal high risk for regional translocation of nonindigenous species in the southwestern Atlantic. Hydrobiologia, DOI: 10.1007/s10750-020-04345-4.

Libros

Se deberá incluir la editorial, ciudad (y país) correspondientes, y las páginas. Ejemplos:

Hakanson L (1999) Water pollution. Backhuys Publishers, Leiden (Holanda), pp. 1-277.

Kennish MJ (1998) Pollution impacts on marine biotic communities. CRC Press, Boca Raton (USA), pp. 1-310.

Libros editados

Seeliger U, Odebrecht C, Castello JP (eds.) (1997) Subtropical convergence environments. The coast and sea in the Southwestern Atlantic. Springer, Berlin (Alemania), pp. 1-308.

Capítulos de libros

- de Kock WC, Bowmer CT (1993) Bioaccumulation, biological effects, and food chain transfer of contaminants in the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*). En: Nalepa TF, Schloesser D (eds.) Zebra mussels: biology, impacts, and control, Lewis Publishers, Boca Raton (USA), pp. 503-533.
- Muñiz P, Venturini N, Brugnoli E, Gutiérrez JM, Acuña A (2019) Río de la Plata: Uruguay. En: Sheppard C (ed.) World Seas: an Environmental Evaluation, Academic Press, London (Reino Unido), pp. 703-724.

Congresos

- Leguizamón F, Paolucci EM, Sardiña P, Sylvester F (2014) Respuestas de las comunidades bentónicas a la facilitación por moluscos invasores y a la contaminación. En: VI Congreso Argentino de Limnología, La Plata (Argentina)
- Puig A, Olguín Salinas HF, Borús JA (2016) Heterogeneidad espacial de la calidad del agua fluvial en la Reserva de Biósfera "Delta del Paraná" bajo condiciones hidrológicas contrastantes. En: Congreso Iberoamericano de Limnología, Valdivia (Chile)

Tesis

- Vallarino EA (2002) La comunidad bentónica intermareal de *Brachidontes rodriguezii* (D'Orb.) y su relación con el efluente cloacal de la ciudad de Mar del Plata (38°S). Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Mar del Plata (Argentina), pp. 1-188.
- Silva ACS (2016) Quantificação de metais potencialmente tóxicos em mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*) por espectrometria de absorção atômica com fonte contínua e alta resolução empregando amostragem direta de sólidos. Tesis de Maestría, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Brasil), pp. 1-108.
- Seears H (2011) Biogeography and phylogenetics of the planktonic Foraminifera. PhD Thesis, University of Nottingham (UK), pp. 1-380.

Página WEB

Soltis P, Soltis D, Edwards C. Angiosperms. Flowering plants. http://tolweb.org/Angiosperms.

United States Environmental Protection Agency. Invasive Species in the Great Lakes. https://www.epa.gov/greatlakes/invasive-species-greatlakes.

Informes técnicos y afines

International Maritime Organization (1997) Guidelines for the control and management of ships' ballast water to minimize the transfer of harmful aquatic organisms and pathogens. Resolution A.868(20) (adopted on 27 November 1997).

http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Assembly/Documents/A.868%2820%29.pdf.

Martin Associates (2018) Economic impacts of maritime shipping in the Great Lakes - St. Lawrence region. The Saint Lawrence Seaway Development Corporation, The St. Lawrence Seaway Management Corporation, The American Great Lakes Ports Association, The Chamber of Marine Commerce, the Lake Carriers Association, The Shipping Federation of Canada. Lancaster (USA). https://greatlakesseaway.com/wp-content/uploads/2019/10/eco_impact_full.pdf.

Manuscritos inéditos

Pérez RP (Ms) The effect of dissolved oxygen, sediment, and sewage treatment plant discharges upon growth, survival and density of Asiatic clams.

Notas periodísticas

Sudacov D (2019) Un mal poco conocido. Intoxicación con metales pesados: silenciosa y potencialmente mortal. Clarín (Buenos Aires, Argentina). 12 de septiembre de 2019. https://www.clarin.com/buena-vida/intoxicacion-metales-pesados-silenciosa-potencialmente-mortal_0_37LsmeQhY.html.

Fernández P, Kippes R (2006) Investigan contaminación por metales pesados. El Litoral (Santa Fe, Argentina). 19 de julio de 2006. https://www.ellitoral.com/index.php/diarios/2006/07/19/medioambiente/MED-01.html.

Anónimo (2020) "ToxiTour", un recorrido por los lugares más contaminados de México. Infobae (Buenos Aires, Argentina). 4 de octubre de 2020. https://www.infobae.com/america/mexico/2019/12/05/toxitour-un-recorrido-por-los-lugares-mas-contaminados-de-mexico/.

Otras fuentes

El formato de estas fuentes de información será más variable dependiendo de su origen y de los datos disponibles. Se tratarán de incluir los siguientes datos:

Autor(es) (nombres, instituciones o "Anónimo", en el caso de artículos sin autor declarado)

Año

Título del documento

Fuente y fecha (nombre del diario o revista, ciudad y país, fecha de publicación)

Dirección WEB (si existe)

En la lista de referencias (Referencias) el ordenamiento es por apellido del primer autor y año (ascendentes), o primero, primero-segundo, primero-segundo-tercero, etc., en caso de años iguales.

