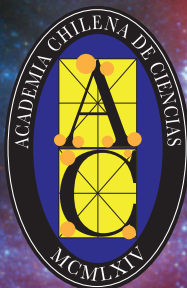


ANALES

DE LA
ACADEMIA CHILENA DE CIENCIAS

Volumen 12 • 2014



ANALES DE
LA ACADEMIA
CHILENA
DE CIENCIAS

Editor

Dr. Rafael Benguria Donoso

Coeditora

Marcela Reyes Azancot

Diseño gráfico

Claudio Silva Castro

Fotografía de portada

ALMA (ESO/NAOJ/NRAO).

Visible light image: the NASA/ESA Hubble Space Telescope

I.S.B.N.: 978-956-8304-14-0

1ª edición: noviembre de 2015

© 2015 por Academia Chilena de Ciencias.

Derechos reservados. Santiago de Chile.

Editado por Academia Chilena de Ciencias.

Almirante Montt N° 454 - Santiago Centro. Teléfono: 224812840.

E-mail: academiadeciencias@academiadeciencias.cl

Santiago de Chile.

Impreso por

Gráfica Andes Ltda.

Santo Domingo 4593

Santiago de Chile

ÍNDICE

Editorial	9
Miembros de Número por Orden de Sillón	11

06 DE MAYO DE 2009

Incorporación del Profesor **Jaime San Martín**, Ingeniero Civil, Matemático del Centro de Modelamiento Matemático de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, como Miembro Correspondiente.

Presentado por el Académico Profesor **Servet Martínez**, Miembro de de Número.

Título de la conferencia: La historia tardía de las probabilidades	17-20
---	-------

18 DE AGOSTO DE 2010

Incorporación del Profesor **Mario Hamuy**, Astrónomo del Departamento de Astronomía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, como Miembro Correspondiente.

Presentado por el Académico Profesor José Maza , Miembro de de Número	21-22
--	-------

Título de la conferencia: La aceleración del Universo a la luz de las supernovas	23-24
---	-------

25 DE MAYO DE 2011

Incorporación del Profesor **Harald Schmidt**, Ingeniero Forestal del Departamento de Silvicultura de la Universidad de Chile, como Miembro Correspondiente.

Presentado por el Académico profesor Tomás Cooper , Miembro de Número	25-26
--	-------

Título de la conferencia: Manejo silvícola de los bosques nativos	27-31
--	-------

19 DE JUNIO DE 2013

Incorporación del Profesor **Carlos Bustamante**, Profesor de Biología Celular y Molecular, Física y Química de la Universidad de California, Berkeley, y Universidad Peruana Cayetano Heredia, como Miembro Correspondiente en Chile.

Presentado por el Académico profesor **Juan A. Asenjo**, Presidente de la Academia Chilena de Ciencias.

Título de la conferencia: **Bioquímica in Singulo** 33-38

26 DE MARZO DE 2014

Incorporación de la Profesora **Carmen Cortázar**, Profesora de Matemática de la Facultad de Matemáticas de la Pontificia Universidad Católica de Chile, como Miembro Correspondiente.

Presentada por el Académico Profesor **Rafael Benguria**, Miembro de Número.

Título de conferencia: **Procesos de difusión**..... 39-44

16 DE ABRIL DE 2014

Presentado por el Académico Profesor **Francisco Hervé**, Miembro de Número 45-47

Incorporación del Profesor **Miguel Angel Parada** Profesor Titular del Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, como Miembro Correspondiente.

Título de la conferencia: **Plutones y Volcanes: descifrando reservorios de magma**..... 49-50

30 DE ABRIL DE 2014

Incorporación del Profesor **Rodrigo Infante Espiñeira**, Ingeniero Agrónomo. Profesor Titular de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Chile, como Miembro Correspondiente.

Título de la conferencia: **Mejoramiento genético de Especies vegetales: el caso del duraznero** 51-60

28 DE MAYO DE 2014

Incorporación de la Profesora **Dora Altbir**, Profesora de Física de la Facultad de Física de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Presentada por el Académico Profesor **Miguel Kiwi Tichauer**, Miembro de Número 61-62

Título de la conferencia: **Del mundo Nanoscopico al mundo visible: una travesía por el magnetismo**..... 63-67

18 DE JUNIO DE 2014

Presentado por el Académico Profesor **Francisco Hervé**, Miembro de Número 69-70

Incorporación del Profesor **Gino Casassa Rogazinski**, Glaciólogo de Geostudios, San José de Maipo y Universidad de Magallanes, Punta Arenas, como Miembro Correspondiente.

Título de la conferencia: **La criósfera: desde cristales de nieve a hielos eternos** 71-76

23 DE JULIO DE 2014

Incorporación del Profesor **José Angel Rutllant**, Ingeniero Civil. Profesor Titular del Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Investigador del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), como Miembro Correspondiente.

Presentado por el Académico Profesor **Servet Martínez**, Miembro de Número.

Título de la conferencia: **Los vientos en el desierto más árido del mundo** 77-84

20 DE AGOSTO DE 2014

Presentado por el Académico Profesor **Juan Carlos Castilla**, Biólogo Marino. Profesor Titular de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Vicepresidente de la Academia Chilena de Ciencias 85-87

Incorporación del Profesor **Osvaldo Ulloa**, Departamento de Oceanografía e Instituto Milenio de Oceanografía, Universidad de Concepción, como Miembro Correspondiente.

Título de la conferencia: **Cuando los océanos se sofocan, los microbios están de fiesta** 89-91

Artículo de la Profesora **Ligia Gargallo**, Doctora en Ciencias Químicas de la Universidad de Chile, Miembro de Número, titulado: **Nuevas orientaciones de las Ciencias Químicas. Materiales Nanoestructurados. Rol de las Interfaces** 93-102

EDITORIAL

Tengo el agrado de presentar un nuevo volumen de los Anales de la Academia Chilena de Ciencias. Este volumen marca un importante aniversario en la historia de la Academia. Hace precisamente 50 años la entonces Academia de Ciencias, en su primera sesión pública, el 29 de septiembre de 1965, en el Salón de Actos del Instituto de Ingenieros de Chile, bajo la presidencia de Gustavo Lira M., recibía como miembro de número a Francisco Javier Domínguez. Francisco Javier Domínguez fue recibido por el académico Carlos Mori. Tanto el discurso de incorporación de Domínguez como el discurso de recepción aparecen, junto a otros, en el primer número del “Boletín de la Academia de Ciencias del Instituto de Chile” publicado en 1968. Desde entonces ha habido algunos cambios de forma, e.g., la Academia de Ciencias cambió su nombre a Academia Chilena de Ciencias, el claustro pasó de 18 a 36 miembros de número y el Boletín fue reemplazado por los actuales “Anales de la Academia Chilena de Ciencias”. Fuera de estos cambios formales, la idea inicial permanece hasta ahora y los Anales continúan transmitiendo las actividades de la Academia, en particular recogiendo los discursos de recepción y de incorporación de sus nuevos miembros. Es muy grato agradecer a los miembros de la Academia que han contribuido con este volumen. Aprovecho esta oportunidad para agradecer especialmente a la Sra. Marcela Reyes Azancot por su gran ayuda en la edición de los Anales.

Rafael Benguria D.
Editor

MIEMBROS DE NÚMERO POR ORDEN DE SILLÓN

DIRECTIVA

JUAN A. ASENJO DE LEUZE DE LANCIZOLLE
Presidente

MARIA TERESA RUIZ GONZALEZ
JUAN CARLOS CASTILLA ZENOBI
Vicepresidentes

ANDRES WEINTRAUB POHORILLE
Tesorero

FRANCISCO HERVE ALLAMAND
Secretario

MIGUEL KIWI TICHAUER
Prosecretario

MEMBRESIA 1964 - 2014 MIEMBROS DE NUMERO (por orden de sillón)

- | | |
|--|--|
| 1. GUSTAVO LIRA MANSO
(1964-1980)
Presidente desde 1964 a 1967.

EDGAR KAUSEL VECCHIOLA
26 de Junio de 1981-
Tesorero desde 1986- | 4. LUIS CERUTTI GARDEAZABAL
(1964-1973)

EDUARDO SCHALSCHA BECKER
(1974-2011)

PATRICIO FELMER AICHELE
19 de diciembre de 2012- |
| 2. EDUARDO CRUZ-COKE LASSABE
(1964-1974)

JOSE CORVALAN DIAZ
(1974-1996)
Prosecretario desde 1977 a 1986.
Secretario desde 1986 hasta Octubre 1996.

MARIA TERESA RUIZ GONZALEZ
3 de junio de 1998-
Premio Nacional de Ciencias 1998 | 5. GUSTAVO HOECKER SALAS
(1964 -2008)
Secretario desde 1964 a 1974.

JUAN CARLOS CASTILLA ZENOBI
16 de Julio 2003 |
| 3. CARLOS MORI GANA
(1964-1985)
Presidente desde 1967 a 1974.

CARLOS ALBERTO LOPEZ SILVA
9 de Diciembre de 1987- | 6. FRANCISCO JAVIER DOMINGUEZ SOLAR
(1965-1988)

ERIC GOLES CHACC
25 de Abril de 1990-
Premio Nacional de Ciencias 1993 |
| | 7. JORGE MUÑOZ CRISTI
(1965-1969) |

LUIS VARGAS FERNANDEZ
Vicepresidente desde 1980 a 1986.
Presidente desde 1986 a 1991
Premio Nacional de Ciencias 1985
(1972-2011)

MARIA CECILIA HIDALGO GONZALEZ
19 de diciembre de 2012

8. JORGE MARDONES RESTAT
(1966-1998)
Presidente desde 1976 a 1980
Premio Nacional de Ciencias 1977

JUAN A. ASENJO DE LEUZE DE LANCIZOLLE
2 de Enero del 2000-
Prosecretario desde Junio 2001-2002
Presidente desde Diciembre 2010- 2015

9. JULIO CABELLO RUZ
(1966-1970)

HERMANN NIEMEYER FERNANDEZ
(1971-1991)

BERNABE SANTELICES GONZALEZ
18 de Mayo de 1992-
Vicepresidente desde Diciembre de 1994-Mayo
de 1996

10. OSVALDO CORI MOULLY
(1966-1987)
Presidente desde 1974 a 1976

TITO URETA ARAVENA
13 de Enero de 1988 -2012
Secretario desde Mayo de 1999-2004

ROMILIO ESPEJO TORRES
18 de Diciembre de 2013-

11. CARLOS MUÑOZ PIZARRO
(1967-1976)

ROLANDO CHUAQUI KETTLUN
(1977-1994)
Vicepresidente desde Diciembre de 1991
hasta Abril de 1994

SERVET MARTINEZ AGUILERA
4 de Septiembre de 1996-
Prosecretario desde noviembre de 1997-
junio 2001
Vicepresidente desde Junio 2001-
Premio Nacional de Ciencias 1993

12. ADELINA GUTIERREZ ALONSO
5 de Diciembre de 1967-2015
Secretaria desde 1974 a 1986.
Vicepresidente desde 1986 a 1991.

VACANTE (11 ABRIL 2015)

13. DR. GABRIEL ALVIAL CACERES
(1967-2001)

RAFAEL D. BENGURIA DONOSO
27 de Junio de 2001-19 Noviembre 2003
(MIEMBRO CORRESPONDIENTE)
19 de Noviembre de 2003-

14. DR. JOAQUIN LUCO VALENZUELA
(1969-2002)
Premio Nacional de Ciencias 1975

JOSE MAZA SANCHO
19 de Noviembre de 2003-

15. DANKO BRNCIC JURICIC
(1969-1998)
Premio Nacional de Ciencias 1987

JUAN RAFAEL VICUÑA ERRAZURIZ
19 de Enero del 2000-
Vicepresidente desde Junio 2001-

16. IGOR SAAVEDRA GATICA
28 de Agosto de 1969-
Vicepresidente desde 1976 a 1980.
Presidente desde 1980 a 1986.
Premio Nacional de Ciencias 1981

17. HECTOR CROXATTO REZZIO
12 de Diciembre de 1969-
28 Septiembre de 2010)
Premio Nacional de Ciencias 1979

NIBALDO INESTROSA CANTIN
20 de diciembre de 2011

18. RODRIGO FLORES ALVAREZ
(1970-2007)

LUIS AGUIRRE LE-BERT
18 de Mayo de 2005

19. RICARDO BAEZA RODRIGUEZ
7 de Diciembre de 1983-

20. CARLOS MUÑOZ AGUAYO
(1984-1992)

ANDRES WEINTRAUB POHORILLE
5 de Mayo de 1993-
Premio Nacional del Ciencias Aplicadas y
Tecnológicas 2000

21. JORGE ALLENDE RIVERA
21 de Diciembre de 1983-
Presidente desde Diciembre de 1991-
Diciembre 1994
Premio Nacional de Ciencias 1992

22. RAUL SAEZ SAEZ
(1984-1992)
Premio Nacional del Ciencias Aplicadas y
Tecnológicas 1992

FRANCISCO ROTHHAMMER ENGEL
30 de Marzo de 1994-
Vicepresidente desde Junio 1996-2001
Presidente Junio 2001-2003

23. NIBALDO BAHAMONDE NAVARRO
20 de Mayo de 1984-
Premio Nacional de Ciencias 1996

24. JUAN DE DIOS VIAL CORREA
29 de Junio de 1984-

25. ENRIQUE TIRAPEGUI ZURBANO
28 de Noviembre de 1984-
Secretario Suplente desde 1986 a 1988.
Prosecretario desde 1989 a 1994.
Presidente desde Diciembre de 1994-
Mayo 2001
Premio Nacional de Ciencias 1991

26. HUMBERTO MATURANA ROMECIN
30 de Octubre de 1985-
Premio Nacional de Ciencias 1994

27. RENE CORTAZAR SAGARMINIAGA
(1985-2008)
Premio Nacional de Ciencias 1994

TOMAS COOPER CORTÉS
20 de diciembre de 2011

28. JUAN GARBARINO BACIGALUPO
13 de Diciembre de 1985-2013
(1985-2013)
Vicepresidente desde Mayo a
Diciembre de 1994.
Premio Nacional de Ciencias 1997

ALEJANDRO BUSCHMANN RUBIO
18 de Diciembre de 2013 -

29. LUIS GOMBEROFF JAIKLES
1986-2010

CARLOS CONCA ROSENDE
19 de diciembre de 2012-

30. LIGIA GARGALLO GONZALEZ
30 de Mayo de 1990 -
Vicepresidenta desde Noviembre de 1997 a
Abril de 1999.

31. EDUARDO FUENTES QUEZADA
1° de Abril de 1992-

32. FERNANDO LUND PLANTAT
3 de Junio de 1992-
Premio Nacional de Ciencias 2000

33. FRANCISCO BRIEVA RODRIGUEZ
23 de Junio de 1993-
Prosecretario desde Diciembre de 1994 a
Noviembre de 1997

34. MIGUEL KIWI TICHAUER
13 de Abril de 1994-

35. DEODATO RADIC FOSCHINO
1° de Diciembre de 1993-
Secretario desde Noviembre 1996 a
Mayo de 1999

36. ARTURO ARIAS SUAREZ
(1994-2000)

FRANCISCO HERVE ALLAMAND
18 de diciembre 2002
Secretario desde 2001

MIEMBROS CORRESPONDIENTES RESIDENTES EN CHILE

HERBERT APPEL APPEL	(1969-1993)	VALPARAISO
ROBERTO FRUCHT	(1979-1997)	VALPARAISO
VICTOR M. BLANCO	(1981-2011)	LA SERENA
BRUNO GUNTER SCHAEFELD	(1981-2010)	SANTIAGO
RENATO ALBERTINI	1990-	SANTIAGO
CATHERINE CONNELLY	1990-	SANTIAGO
ESTEBAN RODRIGUEZ	1992-	VALDIVIA
PABLO KITTL DUCLOT	1993-	SANTIAGO
EDUARDO LISSI GERVASO	1993-	SANTIAGO
YEDY ISRAEL	2001-	SANTIAGO
RAMON LATORRE	2001-	VALDIVIA
CARLOS CONCA	2001-	SANTIAGO
FRANCISCO CLARO	2001-	SANTIAGO
MARIA CECILIA HIDALGO	2001-	SANTIAGO
RICARDO BAEZA-YATES	2002-	SANTIAGO
NIBALDO INESTROSA	2002-	SANTIAGO
RICARDO MACCIONI	2002 -	SANTIAGO
JUAN CARLOS CASTILLA	2002 -	SANTIAGO
ROSA DEVES	2002 -	SANTIAGO
MARY T. KALIN ARROYO	2002 -	SANTIAGO
RAUL MANASEVICH	2002-	SANTIAGO
GUILLERMO CHONG	2003-	ANTOFAGASTA
PABLO VALENZUELA	2003 -	SANTIAGO
LUIS AGUIRRE	2004-	SANTIAGO
ALEDJANDRO TORO-LABBE	2004-	SANTIAGO
CLAUDIO BUNSTER	2004-	SANTIAGO (ELECTO)
ROMILIO ESPEJO	2005-	SANTIAGO
PATRICIO FELMER	2005-	SANTIAGO
MARCO TULIO NUÑEZ	2005-	SANTIAGO
MARIO SILVA	2006-	SANTIAGO
FRANCISCO BOZINOVIC	2006-	SANTIAGO
ALEJANDRO BUSCHMANN	2007-	SANTIAGO
ENRIQUE BRANDAN	2008-	SANTIAGO
GUIDO GARAY	2009-	SANTIAGO
JAIME SAN MARTIN	2009-	SANTIAGO
MIGUEL ORSZAG	2009-	SANTIAGO
CONSTANTINO MPODOZIS	2009-	SANTIAGO
MANUEL DEL PINO	2010-	SANTIAGO
MARIO HAMUY	2010-	SANTIAGO
IVAN SCHMIDT	2010-	SANTIAGO
MARIO ROSEMBLATT	2010-	SANTIAGO
HARALD SCHMIDT	2011-	SANTIAGO
PABLO MARQUET	2013-	SANTIAGO
CARMEN CORTAZAR	2014-	SANTIAGO
DORA ALTBIR	2014-	SANTIAGO
OSVALDO ULLOA	2014-	SANTIAGO
GINO CASASSA	2014-	SANTIAGO
RODRIGO INFANTE	2014-	SANTIAGO
JOSE ANGEL RUTLLANT	2014-	SANTIAGO
MIGUEL ANGEL PARADA	2014-	SANTIAGO
SERGIO LAVANDERO	2015-	SANTIAGO
ROSALBA LAGOS	2015 -	SANTIAGO
EDUARDO ENGEL	2015-	SANTIAGO
JOSE LUIS ARIAS	2015-	SANTIAGO
MARIO SUWALSKY	2015 -	SANTIAGO

MIEMBROS CORRESPONDIENTES RESIDENTES EN EL EXTRANJERO

GIOVANNI B. MARINI BETTOLO	1969-	ITALIA
CLIFFORD BUNTON	1975-	ESTADOS UNIDOS
MOISES AGOSIN	1979-	ESTADOS UNIDOS
PARKER PRATT	1980-	ESTADOS UNIDOS
NEWTON C.A. DA COSTA	1981-	BRASIL
GABRIEL JOSE GASIC	1981-	ESTADOS UNIDOS
CINNA LOMNITZ	1982-	MEXICO
ANDRES O. M. STOPPANI	1986-	ARGENTINA
PEDRO CATTANEO	1986-	ARGENTINA
LUIS ANTONIO SANTALO	1986-	ARGENTINA
HORACIO H. CAMACHO	1986-	ARGENTINA
ORESTE MORETTO	1986-	ARGENTINA
GEORGE E. ERICKSEN	(1992-1996)	ESTADOS UNIDOS
IVAN K. SCHULLER	1992-	ESTADOS UNIDOS
JULIAN GEVIRTZ	1992-	ESTADOS UNIDOS
JULIO E. CELIS	1992-	DINAMARCA
JACOB PALIS	1997-	BRASIL
ARTURO HORTA	1998-	ESPAÑA
PIERRE COULLET	1999-	FRANCIA
JACQUES DEMONGEOT	1999-	FRANCIA
MICHAEL S. KEANE	1999-	USA
GREGOIRE NICOLIS	2000-	FRANCIA
PIERRE COLLET	2000-	FRANCIA
GLORIA ARRATIA	2001-	ALEMANIA
FRANCISCO SALZANO	2001-	BRASIL
GUNTHER UHLMANN	2001-	ESTADOS UNIDOS
VICTOR RAMOS	2001-	ARGENTINA
MAURICE NIVAT	2001-	FRANCIA
FELIPE CABELLO	2002-	ESTADOS UNIDOS
MARIA DE LA LUZ CARDENAS	2002-	FRANCIA
CLAUDE DELLACHERIE	2002-	FRANCIA
LEOPOLDO DE MEIS	2002-	BRASIL
HECTOR N. TORRES	2002-	ARGENTINA
HERNAN CHAIMOVICH	2002-	BRASIL
ATHEL CORNISH-BOWDEN	2003-	FRANCIA
RAJANIT CHAKRABORTY	2003-	ESTADOS UNIDOS
SIMON LITVAK	2003-	FRANCIA
MARIO MARKUS	2003-	ALEMANIA
ROBERT PANKHURST	2004-	INGLATERRA
MARGUERITE RINAUDO	2005-	FRANCIA
JOAN JOSEPH GUINOVAR	2005-	ESPAÑA
CHARLES MENEVAU	2005-	ESTADOS UNIDOS
DAVID SABATINI	2005-	ESTADOS UNIDOS
PHILLIP GRIFFITHS	2006-	ESTADOS UNIDOS
EVARISTO RIANDE	2007-	ESPAÑA
RICARDO AROCA	2009-	CANADA
MARTEEN CHRISPELLS	2008-	ESTADOS UNIDOS
MARCELO VIANA	2009-	BRASIL
MARK ASHBAUGH	2010 -	ESTADOS UNIDOS
SIR TOM BLUNDELL	2010-	INGLATERRA
MARC ETIENNE BRACHET	2011-	FRANCIA
MIKEL LOSS	2012-	ESTADOS UNIDOS
MARIANA WEISSMANN	2013-	ARGENTINA
CARLOS BUSTAMANTE	2013-	ESTADOS UNIDOS

MIEMBROS HONORARIOS

ALEJANDRO LIPSCHUTZ	(1972-1980)	LITUANIA
SEVERO OCHOA	(1977-1993)	ESTADOS UNIDOS
LUIS F. LELOIR	(1978-1987)	ARGENTINA
CHOH HAO LI	(1978-1988)	ESTADOS UNIDOS
VENANCIO DEULOFEU	(1982-1987)	ARGENTINA
CRODOVALDO PAVAN	1987-	BRASIL
CARLOS CHAGAS	1987-	BRASIL
ILYA PRIGOGINE	1991-	BELGICA
ANTONIO GONZALEZ	(1992-2002)	ESPAÑA
PETER RAVEN	1992-	ESTADOS UNIDOS
SIR JOHN KENDREW	(1992-1997)	INGLATERRA
JACQUES LOUIS LIONS	(1993 -2001)	FRANCIA
TULIO REGGE	1993-	ITALIA
PATRICK SUPPES	1993-	ESTADOS UNIDOS
FEDERICO MAYOR	1996-	ESPAÑA
ELLIOT LIEB	2007-	ESTADOS UNIDOS
PIERRE LOUIS LIONS	2011-	FRANCIA
SIR TOM BLUNDELL	2014-	INGLATERRA

MEDALLA ACADEMIA CHILENA DE CIENCIAS 2008

SR. ENRIQUE D' ETIGNY LYON

Presentado por el Académico
Miembro de Número
Profesor Servet Martínez

Incorporación como Miembro Correspondiente
en Chile de la Academia Chilena de Ciencias del
Instituto de Chile • 06 de Mayo de 2009

LA HISTORIA TARDÍA DE LA PROBABILIDADES

Profesor Jaime San Martín

Ingeniero Civil - Matemático

*Centro de Modelamiento Matemático de la Facultad de Ciencias Físicas y
Matemáticas de la Universidad de Chile*

La idea de este discurso es presentar de manera simple una historia resumida de las probabilidades. De antemano quiero dejar establecido que no soy un experto en la historia de esta rama de las matemáticas y trataré de mostrar algunos de los hitos importantes de ella. Al final mostraré, como el trabajo de nuestro grupo se engarza en esta aventura.

Es sorprendente que las probabilidades aparezcan en la historia de las ciencias tan tardíamente. Los primeros trabajos de probabilidades se remontan a la escuela italiana del siglo XVI, principalmente asociado a los trabajos de Cardano. Sin embargo, los expertos cifran el comienzo del tratamiento sistemático de las probabilidades en el siglo XVII, en una serie de cartas entre Pierre Fermat y Blaise Pascal (1654) al respecto de ciertos juegos de azar, que explicaré mas adelante.

Los juegos de azar tienen sus primeras trazas en las culturas antiguas tales como Sumerios, Asirios, Egipcios entre otros. Hay rastros de dados antiguos que datan de mas de 5000 años. Sin duda la humanidad siempre ha estado fascinada por el azar y su modelación no ha sido algo fácil. Entonces, ¿por qué aparece tan tarde un tratamiento más riguroso de los fenómenos aleatorios?. Una posible explicación, dicen algunos pensadores, es que esto se debe a que se necesitaron ciertos requisitos básicos para su desarrollo. Entre otros, tener un sistema numérico bas-

tante avanzado que permita hacer cálculos y simulaciones de eventos complicados. Además un álgebra también de cierto desarrollo para poder manejar simbólicamente y escribir los resultados básicos. Finalmente, aunque parezca paradójico un entendimiento mayor de los que significa el determinismo y como hay fenómenos que no caen en esa categoría. Es decir, entender que es mejor (y factible) modelar la frecuencia de caras en una serie de lanzamientos de una moneda, que tratar de predecir por medio de la mecánica el resultado particular de un lanzamiento dado, si de todas maneras lo que interesa es el comportamiento acumulado de un número grande de repeticiones de este experimento.

El problema que da origen al estudio sistemático de las probabilidades puede ser enunciado de la siguiente manera. Supongamos que dos jugadores que denotaremos por **A** y **B** se enfrentan en un juego de azar. Para fijar ideas supongamos que una tercera persona lanza consecutivamente una moneda equilibrada y ambos deben adivinar el resultado de cada lanzamiento. En cada lanzamiento se le da un punto al jugador que adivino el resultado de ese ensayo. El juego se detiene cuando uno de los jugadores acumula 10 puntos, es decir cuando uno de ellos ha adivinado 10 lanzamientos y el otro ha adivinado menos de 10. Obviamente el jue-

go se juega a lo más 19 veces. El jugador que gana se lleva un pozo inicial de dinero, que para efectos de la presentación diremos que consta de 10.000 pesos. La pregunta que se trató de responder es que sucede si el juego se detiene, por alguna razón, antes de que alguno de los jugadores complete los 10 juegos ganados y es necesario repartir el pozo inicial. ¿Cuál es la repartición justa?

Muchos podrían pensar que dado que el juego se detuvo la repartición justa es mitad y mitad para cada uno. Esto es así, pensamos, si ambos jugadores llevan ganados igual número de adivinanzas. Pero, si uno de ellos lleva más adivinanzas que el otro, no parece justo dividir el pozo en partes iguales. Digamos que **A** ha ganado 6 juegos y **B** lleva sólo 3. Alguien podría argumentar que lo justo sería repartir el pozo de acuerdo a las proporciones dadas por la cantidad de partidos ganados de cada uno. Esto es para **A** le correspondería 6/9 del pozo y a **B** 3/9 del mismo.

Esta respuesta aunque tiene su lógica, aunque cerca de la respuesta correcta no es lo que corresponde. Piense que pasaría si **A** hubiese ganado 6 y **B** ninguna. ¿Lo justo sería que **A** se llevara todo el pozo? Ambos matemáticos dieron métodos distintos para calcular la manera justa de repartir el pozo, ambas son correctas y muy interesantes. Esencialmente, la forma de repartir el pozo es usando las probabilidades que cada uno tiene de ganar si el juego continuara hasta que uno de ellos complete 10 juegos.

Si tomamos una forma de pensar moderna, desde el punto de vista de la simulación, la repartición justa es aquella que se obtiene de continuar el juego una gran cantidad de veces, partiendo de la condición **A** tiene 6 juegos ganados y **B** 3. Para cada una de estas simulaciones, determinar que jugador ganaría en esa simulación y finalmente repartir el pozo de acuerdo a la fracción de veces que ganó cada uno de ellos. La justificación de esta estrategia será presentada después.

Una simulación de tamaño 10.000 (realizada en mi computador personal) da una aproximación de la probabilidad que gane **A** de 0.88, bastante diferente de 6/9 que es aproximadamente 0.67.

El siguiente paso de esta historia fue dado por Jacob Bernoulli (1713) en su *Ars Conjec-*

tandi. Nos referimos a la famosa ley de los grandes números. Esta establece que si un experimento aleatorio, digamos lanzamientos sucesivos de una moneda equilibrada, es realizado una gran cantidad de veces (en rigor cuando el número de realizaciones tiende a infinito) la frecuencia empírica observada, es decir la fracción de casos favorables versus casos totales converge a la probabilidad del evento en cuestión. En nuestro ejemplo de los lanzamientos de monedas, la fracción empírica de las caras observadas tiende a 1/2 (si la moneda es equilibrada).

En nuestro juego inicial estudiado por Fermat y Pascal, las simulaciones de los posibles juegos dan, de acuerdo a la ley de los grandes números, una estimación de la probabilidad que gane por ejemplo el jugador **A**. Notar que en este caso las dos probabilidades no son iguales, es decir, es como jugar con una moneda desequilibrada. De todas maneras la ley de los grandes números es válida y de ahí su gran utilidad. Esta ley ha sido extendida y estudiada profundamente siendo de algún modo la base de la estadística.

Sin embargo la ley de los grandes números no sería tan útil si es que no tuviéramos idea de la desviación entre la frecuencia empírica y la frecuencia límite. Este paso fue iniciado por Pierre Simón Laplace a fines del siglo XVIII, quien estudió como los coeficientes binomiales se aproximan a la distribución normal. En otro lenguaje el desvío entre la frecuencia observada de caras en n lanzamientos de una moneda equilibrada y su valor límite $1/2$ está dado por la aproximación, válida para todo x :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - \frac{1}{2} \leq x \sqrt{\frac{n}{4}}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-z^2/2} dz$$

Aquí $X_i = 1$ si la moneda en el lanzamiento número i sale cara, 0 sino. Vemos que el error cometido es del orden de $\sqrt{n}$.

Este es el desvío teórico de la frecuencia empírica, en una gran cantidad de experimentos, que si es normalizada por $\sqrt{n}/4$ se aproxima al que daría la ley normal. Este resultado nos da entonces un control sobre cuánto es esperable que la frecuencia empírica se aparte del valor asintótico. Estos dos resultados nos permiten traer orden a un área del pensamiento que trata de estudiar la aleatoriedad, que se caricaturiza como lo

impredecible. En un sentido simple cada lanzamiento de una moneda lo es pero el comportamiento colectivo de un gran número de lanzamientos obedece ciertas leyes bien precisas. Este fenómeno colectivo, es una ley universal que es válida mucho más allá del experimento de lanzamientos de monedas equilibradas independientes y está presente en (casi) cualquier modelo donde hay una repetición de fenómenos independientes.

Aún cuando estos resultados permiten estudiar los fenómenos aleatorios, la probabilidad era mirada con desconfianza y no tenía un fundamento bien establecido hasta principios del siglo XX cuando uno de los matemáticos más determinantes de ese siglo le dio un marco teórico. Este matemático fue Andréi Kolmogórov, quien propuso fundar la teoría de las probabilidades usando la teoría de la medida, es decir la integración. Este modelo es el más utilizado en la actualidad y ha permitido que las probabilidades representen hoy en día un área de investigación tan bien establecida como las otras.

De forma paralela a esta historia, surgió en la primera mitad del siglo XIX un tema que traería gran importancia y profundidad a las probabilidades. Me refiero al Movimiento Browniano. Robert Brown fue un botánico escocés que estudio el movimiento errático que describen las partículas de polen suspendidas en agua. Este fenómeno errático había sido observado antes por Jan Ingenhousz, usando partículas de carbón. Sin embargo el movimiento en cuestión se le denomina browniano, por supuesto en honor a Brown, aún que éste no pudo dar una explicación satisfactoria al fenómeno en cuestión. Habría que esperar hasta 1905 cuando Albert Einstein lo relacionara con la vibración de las moléculas del agua. De manera sencilla podemos pensar que una partícula de polen recibe una serie de impulsos de las moléculas de agua, y así el desplazamiento de la partícula de polen es la suma de una gran cantidad de movimientos pequeños e independientes. Como consecuencia entonces, el desplazamiento total satisface el teorema central del límite, y por lo tanto es esperable que la probabilidad $p(t, x)$ (densidad de probabilidad más precisamente) que la partícula se encuentre en una posición dada en un instante dado está dada por el de una normal. La media de esta normal es cero (la posición

inicial) y la varianza es proporcional a t . Esta densidad satisface la ecuación del calor, que es la base de la construcción de Einstein. Una observación importante es que el movimiento browniano no tiene velocidad (su velocidad es infinita en un cierto sentido) más bien el desplazamiento cuadrático (medio) es lineal en el tiempo. Este hecho básico fue utilizado para dar una estimación del número de Avogadro, ajustando observaciones del movimiento con el modelo de Einstein.

Desde el punto de vista de la matemática, el movimiento browniano fue construido formalmente por Norbert Wiener en la década del 20. Su preocupación principal era estudiar las trayectorias irregulares del movimiento. Otros matemáticos importantes en esta teoría son Kiyoshi Itô y Paul Lévy. También es necesario mencionar a Louis Bachelier quien, previo al artículo de Einstein, dio una interpretación del movimiento browniano en economía y predijo ciertas leyes del movimiento que años después fueron probadas formalmente.

El movimiento browniano juega hoy en día un rol fundamental en matemáticas y en muchas aplicaciones. En particular, en física donde está íntimamente relacionado con la fórmula de Feynman-Kac y en finanzas en el famoso modelo de Black-Scholes. En palabras sencillas el movimiento browniano es usado como modelo para introducir perturbaciones aleatorias.

Parte importante de la investigación que desarrolla el grupo al que pertenezco es el estudio de algunas preguntas relacionadas con el movimiento browniano. En particular nos hemos interesado en lo que se llama distribuciones cuasiestacionarias en modelos de difusión (y otros modelos probabilistas). Esta teoría tiene aplicaciones en economía, principalmente en teoría de ruina y en ecología, entre otras. Supongamos que estudiamos un fenómeno transiente, como el tamaño de una población animal. En la mayoría de los modelos probabilistas de estas poblaciones existe el llamado tiempo de extinción, es decir un instante donde la población alcanza el estado absorbente de desaparición. Una pregunta importante es cual es la distribución de la población al instante t , cuando la extinción aún no ocurre, para tiempos t muy largos. En muchos casos, la distribución normalizada de la población, condicionado a no extinción al instante t , converge a lo que se llama una

distribución cuasiestacionaria, y por lo tanto el conocimiento de éstas nos da una aproximación de como es la población para tiempos largos, dado que aún sobrevive.

Quisiera explicar una de las relaciones, para mi gusto, más hermosas entre las probabilidades y la física. Como explicáramos antes, la densidad del movimiento browniano satisface la ecuación del calor

$$\frac{\delta p}{\delta t} = \frac{1}{2} \Delta p$$

Esta relación va más allá. Supongamos que quisiéramos estimar la distribución de equilibrio que alcanza una placa metálica, que para efectos de simplificar supondremos cuadrada y sometida a temperatura constante en sus bordes. Digamos que dos de los bordes (opuestos) están a 0 grados Celsius y los otros dos a 100. Si dejamos esta placa por largo rato, cual será la temperatura de equilibrio en cada punto de la placa. La solución de este problema es parte de lo que se conoce como problema de Dirichlet (en honor de Lejeune Dirichlet). Una manera de representar la solución de este problema usa el movimiento browniano. Para ello se simula un movimiento browniano desde un punto dado de la placa y detener el movimiento cuando llegue a la frontera de la placa. Dado que el movimiento es aleatorio (tal como cuando lanzamos una moneda) a que cara del borde llegará es también aleatorio. Si cuando llega a los bordes que están en 0, anotamos un 0 y hacemos lo propio cuando llega a los bordes que están a 100 anotamos 100. Así por cada trayectoria que parte del

mismo punto, esperamos que llegue al borde y anotamos 0 o 100 según corresponda. La fracción empírica de estos 0 y 100 converge a la temperatura de equilibrio del lugar donde partimos. Esto corresponde a la ley de los grandes números. ¿Cómo se realiza esta simulación? pues en un computador no es posible simular una trayectoria exacta de un movimiento browniano. Para ello se usa lo que se conoce como el principio de invarianza, que es una versión sofisticada del teorema central del límite. En pocas palabras, se aproxima la placa por una malla finita equidistante y el movimiento browniano se aproxima por una marcha aleatoria discreta que consiste en desplazarse de un punto de la malla a uno de los cuatro vecinos con igual probabilidad. Posteriormente se usa el mismo algoritmo, es decir anotar un 0 si la marcha sale por los bordes con 0 grados y 100 en el caso contrario. Este procedimiento produce una aproximación a la temperatura buscada que a medida que la malla es más y más fina se aproxima a la solución buscada.

Quisiera terminar agradeciendo a mis padres por todo, a mi querida esposa por su gran compañía y paciencia, a mis hijos por dar sentido a lo que hacemos. A mis amigos por estar siempre ahí. También agradecer a mis profesores, que son las personas más influyentes en mi vida y parte de la profesión más noble. A todos ellos, los tengo muy profundamente en mis recuerdos y en mis pensamientos y quiero personalizar en mi colega y profesor Servet Martínez todo mi agradecimiento que tengo por todos ellos.

Recepción del Académico Miembro de Número, Profesor José Maza

.....

Es para mi un honor el que la Academia Chilena de Ciencias, del Instituto de Chile, me haya solicitado presentar al Dr. Mario Hamuy que hoy se incorpora a la Academia. Es un placer presentar a Mario pues es un gran científico y mi colega, desde hace ya muchos años, mi amigo.

No es mi ánimo hacer una análisis exhaustivo de la vida y obra de Mario, pero empezaré contándoles que el hizo sus primeros estudios en la Alianza Francesa, donde obtuvo una excelente educación que lo llevó a ingresar a la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile en el año 1977. Estudió "Bachillerato en Física" y continuó en la misma facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas con un "Magíster en Física".

En 1983 Mario entró en contacto con la Astronomía cuando decide hacer una tesis de Magíster en un tema astronómico y sostiene conversaciones con Jorge Melnick, uno de los jóvenes astrónomos del Departamento de Astronomía. Con la ayuda del profesor Hugo Moreno, Mario hace sus primeras observaciones en el telescopio de 24 pulgadas de Cerro Tololo, haciendo fotometría fotoeléctrica de cúmulos globulares. Después de docenas de noches de laboriosa observación identificando y centrando en un diafragma especial cada cúmulo, terminó su tesis y sus resultados fueron publicados en la revista europea *Astronomy and Astrophysics* con el título "Half-light integrated UBVRI photometry of

southern globular clusters" y "Physical parameters for globular clusters from UBVRI integrated photometry".

En 1983, siendo estudiante, Mario asistió a su primera reunión astronómica en Buenos Aires, con un grupo de astrónomos y estudiantes de Cerro Calán. Fue un viaje bastante especial, donde llegamos a Buenos Aires, por tierra, después de 24 horas de conducción colectiva en dos automóviles, un grupo de 8 personas. En verdad no recuerdo el trabajo que Mario presentó allá pero si recuerdo un calor cercano a los 40 grados que acompañó todas las actividades de la reunión. Ese viaje sin duda afianzó los lazos de Mario con los astrónomos del Departamento de Astronomía y es en alguna medida la pre-historia de la larga colaboración científica que yo he tenido con él.

En 1984 Mario terminó su tesis de Magíster, recibió su grado académico y publicó los artículos ya mencionados. Como su interés por la astronomía era creciente, lo invité a trabajar conmigo en fotometría fotoeléctrica de núcleos activos de galaxias. Durante 1985 y 1986 Mario visitó Cerro Tololo en innumerables ocasiones, para hacer fotometría con el telescopio de 24 pulgadas, el de 36 pulgadas e incluso con el pequeño telescopio de 16 pulgadas. Este trabajo fue publicado en un par de artículos en la revista *Astronomy and Astrophysics*.

En octubre de 1986 asistí a una reunión en Tucson, Arizona, y en ella el Director del Observatorio de Cerro Tololo, Bob Williams, hoy Presidente de la Unión Astronómica Internacional, IAU, me preguntó si conocía a algún joven talentoso que le pudiese ayudar a ellos en Tololo con la introducción de nuevos desarrollos computacionales y la puesta en operación de sistemas fotométricos bidimensionales, CCD, que estaban recién empezando. Yo sin dudarle le recomendé a Mario, que después de las correspondientes conversaciones con Bob en La Serena, aceptó el trabajo; debía presentarse en la oficinas de Tololo a fines de febrero.

El 24 de febrero de ese año fue descubierta la supernova más brillante de los últimos cuatro siglos (SN1987A). Mario tan pronto llegó a la oficina de Tololo y saludó a Bob Williams, le pidieron que subiera a Tololo a organizar las observaciones fotométricas de esta nueva estrella, con el pequeño telescopio de 40 centímetros. La estrella era tan brillante que tuvo que construir un obturador (una plancha de madera) en la boca del telescopio para que la luz de la SN no dañara el tubo fotomultiplicador.

Mario estuvo en Cerro Tololo trabajando entre 1987 y 1995. En esos años las supernovas pasaron a ser un tema muy atractivo para muchos astrónomos y así se construyó un grupo en Tololo encabezado por Mark Phillips y Nick Suntzeff con la participación de Bob Schommer y con Mario como la figura que nucleaba al grupo. En esos años llevamos a cabo el proyecto Calán-Tololo que nos permitió descubrir 50 supernovas y caracterizar la curva de luz de 29 supernovas de tipo Ia. La parte “Calán” de la colaboración era Marina Wischnjewsky, Roberto Antezana y yo. Cuatro artículos publicados en 1996 en la revista *Astronomical Journal* resumen 5 años de trabajo. Sin duda Mario les contará hoy los resultados de esos trabajos.

En 1995 lo invité a ser mi co-investigador joven en mi Cátedra Presidencial de Ciencias. El tiempo ha demostrado con creces que fue una excelente elección.

En 1995 Mario decide irse a doctorar en EEUU. Se va a la Universidad de Arizona, donde hay una gran grupo de astronomía y además está la sede norte de AURA, institución que opera en Chile el Cerro Tololo. Tucson es sin duda la capital de la astronomía

observacional en EE.UU. continental. Hizo allí un brillante Ph.D. entre 1995 y el 2001.

El 2001 obtuvo una Beca Post-doctoral Hubble concedida por el Instituto del Telescopio Espacial Hubble y la NASA. Hay que hacer notar que a esas becas postulan 1.000 Ph.D. de todo el mundo y la obtienen solo 20. Además le fue ofrecida una Beca Spitzer de la Universidad de Princeton, que rechazó. Con su Beca Hubble, Mario se fue a trabajar a Pasadena en la *Carnegie Institution of Washington*, que maneja en Chile el Observatorio de Cerro Las Campanas. Después de tres años de Beca Hubble le fue concedida una beca Carnegie por dos años más.

Durante su estadía en Pasadena Mario ganó un “Grant” de la *National Science Foundation* titulado: “Measuring the Universe with Supernovae” que dio origen al Carnegie Supernova Project, CSP, que ha dado excelente resultados en los últimos años. Allí Mario volvió a trabajar junto a Mark Phillips, sumando a Miguel Roth, Nidia Morrel, Gastón Folatelli, y otros.

En el 2005 Mario regresó a la Universidad de Chile, ahora como profesor del Departamento de Astronomía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Desde el 2008 se desempeña como Director del Departamento. En el 2008 el lideró la presentación de un Núcleo de Supernovas a la Iniciativa Científica Milenio del Ministerio de Planificación.

Mario ha publicado a la fecha 103 publicaciones ISI en revistas de la especialidad. Sus trabajos han merecido 7.969 citas (18 Agosto 2010); tiene un índice H de 49. Es el astrónomo con más citas en el país y posiblemente unos de los científicos más citados del país en todas las áreas de la ciencia.

Entre 2004 y 2006 fue miembro del Programa Ciencias de Fronteras de esta Academia.

Mario destaca por un rigor científico, su inmensa capacidad de trabajo y su muy buen criterio para saber elegir los temas más relevantes en el área de las supernovas. Su capacidad para organizar proyectos es notable.

Dejo con ustedes al profesor Hamuy que nos dará una conferencia titulada: “La aceleración del Universo a la luz de las supernovas”

LA ACELERACION DEL UNIVERSO A LA LUZ DE LAS SUPERNOVAS

Profesor Mario Hamuy

Astrónomo

*Profesor Titular del Departamento de Astronomía
de la Universidad de Chile*

Señor Presidente de la Academia Chilena de Ciencias, Dr. Juan Asenjo, miembros de la Academia, colegas, estudiantes y amigos.

Quisiera partir por agradecer a la Academia Chilena de Ciencias por haberme acogido y honrado como integrante de esta prestigiosa institución, luego de haber analizado los currícula de otros prestigiosos académicos. Espero estar a las alturas de esta distinción retribuyendo con la más activa participación posible en esta Academia.

Un agradecimiento especial por las elogiosas y cariñosas palabras de bienvenida de José Maza, que provienen de un colega, profesor y amigo.

Agradezco a todos Uds, especialmente a mi familia, por acompañarme en esta ceremonia de incorporación como miembro correspondiente a la Academia, la que tiene enorme relevancia para mí.

Esta incorporación es un gran honor para mí, la que me ha llevado a revivir mi carrera científica desde sus inicios para tratar de rescatar lo que a mi juicio han constituido mis contribuciones más relevantes a la Astronomía y poder resumírselas a Uds. en esta conferencia. La he titulado “La aceleración del Universo a la luz de las supernovas”, ya que este estudio ha captado gran parte de mis energías y ha conducido a uno de los descubrimientos más importantes de la Astrofísica de los últimos años.

Mi cercanía con las supernovas tiene su origen en una casualidad. La SN 1987^a fue, literalmente, un regalo caído del cielo. Luego me interesé en realizar un estudio sistemático de estos objetos. Con el apoyo de Fondecyt, logré armar un equipo de investigadores de Cerro Calán y Cerro Tololo para investigar el uso de las supernovas de tipo Ia como indicadores de distancias. El proyecto Calán/Tololo demostró entre 1995-1996 que, si bien este tipo de supernovas no son patrones lumínicos, su luminosidad se puede calibrar con una gran precisión. Esto nos permitió medir la expansión del Universo con una gran precisión y de allí obtener, junto a la calibración de las estrellas Cefeidas realizada con el telescopio espacial Hubble, la medición más precisa de la edad del Universo. Investigaciones posteriores realizadas por dos grupos de astrónomos, lograron aplicar la técnica y calibración del proyecto Calán/Tololo a supernovas mucho más lejanas. Combinando las dos muestras de objetos, estos dos grupos lograron medir de manera independiente en 1998, que el Universo se encuentra en una expansión acelerada debido a una misteriosa energía que constituye el 70% de todo lo que hay en el Universo. El origen físico de esta energía aún es un misterio y uno de los temas de mayor interés astrofísico en todo el mundo.

Deseo agradecer a quienes han tenido un rol importante en mi carrera científica: Monsieur.

Bechon, Igor Saavedra, Hugo Moreno, Jorge Melnick, José Maza, Nick Suntzeff, Mark Phillips, Steve Heathcote, Philip Pinto. A mis actuales colaboradores del Centro Milenio de Estudios de Supernovas: Alejandro Clocchiatti, Giuliano Pignata, Gastón Folate-lli, Francisco Forster, Joe Anderson, Melina Bersten, Luis González, Roberto Antezana, Alejandro Leal, Mariela Fajardo, Patricia Monroy, y alumnos. A mi familia un especial reconocimiento por su incondicional apoyo y paciencia.

Estudié en la U. de Chile, luego trabajé en el Observatorio de Cerro Tololo, y posteriormente viajé a la U. de Arizona a trabajar en mi doctorado. Deseo agradecer estas tres instituciones que lograron consolidar en mí una

marcada vocación por la Astronomía, desde una temprana niñez, subido arriba del techo de mi casa tratando de ver el cometa Kohoutek con los binoculares destinados originalmente por mi padre para seguir de cerca las carreras en el Hipódromo. Si bien el cometa fue un fiasco y no lo logré ver, quizás porque los binoculares no estaban hechos para objetos tan remotos, esas experiencias encaramado en el techo me acercaron a los misterios del cielo, gatillaron mi curiosidad y cautivaron mi imaginación por el espacio, lo que 40 años más tarde me han encumbrado hasta la Academia Chilena de Ciencias.

Recepción del Académico Miembro de Número, Profesor Tomás Cooper

.....

La Academia Chilena de Ciencias me ha pedido que reciba al Prof. Harald Schmidt como Miembro Correspondiente lo que constituye para mí un honor y una gran alegría.

El Prof. Schmidt, al igual que algunos miembros de la Academia, trabaja en el ámbito aplicado de la Ciencia. En un área que es particularmente importante para el país ya que una considerable porción de su territorio está o debiera estar cubierta de bosques. Su especialidad es la silvicultura y particularmente la investigación en el desarrollo de sistemas complejos de manejo del bosque nativo.

Harald nació en Alemania, en la linda ciudad de Freiburg, y llegó a Chile a los 11 años de edad y sin conocer el idioma. Sus estudios secundarios (humanidades) los realizó en el Colegio Alemán donde afortunadamente para él tenía clases en español y alemán.

Ingresa posteriormente a la Escuela de Ingeniería Forestal de la Universidad de Chile, claro está, como alumno destacado. Su primer trabajo académico fue nada menos que con el Prof. Jochen Kummerow destacado botánico alemán que realizó un importante aporte al desarrollo científico en la disciplina en Chile. Se tituló de Ingeniero Forestal en 1964 y posteriormente viajó a Alemania como alumno de doctorado de la Universidad de Göttingen.

Volvió como académico a la Universidad donde prontamente comenzó con el progra-

ma de Ecología y Silvicultura del bosque nativo. Adelantándose un poco puedo decir que lo que se conoce de silvicultura del bosque nativo chileno actualmente se debe fundamentalmente al trabajo de Harald Schmidt en ese programa que ha continuado con tenacidad desde el año 70 hasta nuestros días.

La trayectoria académica del Prof. Schmidt es un excelente ejemplo de una destacada labor universitaria al servicio de la ciencia, la tecnología y el desarrollo del país. Parte muy importante de su esfuerzo lo dedicó a la formación de personas, ya sea como alumnos o, posteriormente, como ayudantes y colegas. Harald no solo formó académicos en Chile, lo hizo también en Alemania, como profesor guía de sus tesis de doctorado o posibilitando su formación en ese país, líder mundial en esa especialidad.

Harald Schmidt es el académico y especialista más destacado en silvicultura del bosque nativo y prácticamente todos los especialistas de esa área son discípulos suyos. Pero no solo en Chile sino también en la Patagonia Argentina, donde incluso, a raíz que los asesoró en investigación y desarrollo de métodos de manejo silvícola, se considera, al decir de un académico argentino en una reunión de la especialidad en 1988, que hay dos etapas en esos bosques: antes y después del Prof. Schmidt.

Presentaré brevemente algunos datos curriculares. Profesor titular de la Universidad

de Chile, en docencia universitaria, desde 1970 a la fecha, ha sido profesor responsable de las asignaturas de Genética Forestal, Dinámica de Bosques y Silvicultura de Bosques Nativos.

Ha guiado 60 memorias de título de la Escuela de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile y ha actuado como Profesor Guía en tesis de doctorado de las Universidades de München, Freiburg, Göttingen y Münster donde es Profesor Visitante. En el año 2004 estableció un convenio de Investigación y Docencia con el Waldzentrum (Centro de Bosques) de la Universidad de Münster.

Ha centrado su labor de Investigación en el conocimiento del bosque nativo de Chile y a través de este conocimiento en el desarrollo de Sistemas Silviculturales para el manejo sustentable de estas entidades y en el establecimiento de ensayos para la regeneración y tratamientos silvícolas que permitan mejorar y en muchos casos optimizar la producción de estos bosques.

Desde 1971 a la fecha ha realizado una serie de trabajos de investigación en bosques nativos de Hualo, Roble, Araucaria, Coihue-Raulí, Lenga y Coihue de Magallanes y Ñirre. La orientación de los trabajos ha sido biológica, sobre la estructura y la dinámica natural de los bosques y en los aspectos aplicados de manejo silvicultural y productivo, pudiéndose señalar dos ejemplos del tipo de investigación y sus implicancias para el sector productivo. Estos son los ensayos en el bosque de araucaria en Lonquimay (1980-2003) y en los bosques de lenga en Magalla-

nes (1978-hasta el presente). Actualmente el manejo sustentable en estos bosques y su cosecha se realiza bajo los principios y las normas que se generaron a través del programa de investigación que él desarrolló. El manejo de los bosques de lenga en Magallanes se destaca positivamente del resto de los bosques nativos en el país. Del punto de vista productivo los bosques de lenga son los más importantes del bosque nativo. En ellos se cosecha aproximadamente un tercio del volumen total y se obtiene el 70 % del valor de los bosques nativos de Chile.

Ha recibido numerosos premios, entre los más recientes en 2008 la Corporación Chilena de la Madera lo premia por la significativa contribución al desarrollo de la educación e investigación en el sector forestal chileno, en 2010 la Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile, por el valioso aporte y destacada trayectoria académica y en junio de 2010 el Colegio de Ingenieros Forestales de Chile le otorga su máxima distinción gremial: Premio a la trayectoria profesional en reconocimiento al fecundo y brillante desempeño en la actividad forestal.

Harald además es una persona muy afable, tranquilo, y aunque parece callado en realidad es un buen conversador. Es responsable y de una honorabilidad a toda prueba. Así, es un gran placer y un especial honor recibirlo como Miembro de la Academia Chilena de Ciencias.

MANEJO SILVÍCOLA DE LOS BOSQUES NATIVOS

Profesor Harald Schmidt

*Ingeniero Forestal del Departamento de
Silvicultura Universidad de Chile*

Quiero en primer lugar agradecer a los integrantes de la ACADEMIA CHILENA de CIENCIAS, el que me hayan incorporado como miembro. Lo que para mi es un gran gran honor, ser el primer Ingeniero Forestal que se integra en esta entidad.

Nací en Alemania en la Selva Negra en una familia ligada a los bosques y el aprovechamiento de la madera. A los 11 años llegué a Chile. Opté por la nacionalidad chilena. Me formé en la Universidad de Chile, en la que hoy es la Facultad de Ciencias Forestales. Soy Ingeniero Forestal y he trabajado fundamentalmente sobre el manejo silvícola en los bosques nativos.

Chile es un país forestal

Chile tiene una superficie de 75 millones de hectáreas. Cuando llegaron los españoles, el país estaba cubierto por 40 millones de hectáreas de bosques nativos. Hoy debido a la colonización del territorio quedan alrededor de 13 millones de hectáreas de bosques nativos, los que no se han tratado muy bien... Pero en países forestalmente desarrollados, como los centroeuropeos y Alemania donde se inició la silvicultura, estarían felices, si tuvieran a lo menos 100 hectáreas de bosques vírgenes. En Chile a los bosques naturales se agregan 2,3 millones de plantaciones, principalmente de pino, eucalipto y acacia, especies en las que se sustenta la actividad productiva.

En términos económicos la magnitud del sector forestal, es el segundo en importancia, después de la minería.

Hasta mediados del siglo pasado, la madera y los ingresos económicos provenían fundamentalmente del bosque nativo. Después comienza a tener más importancia la madera de las plantaciones y el bosque nativo pasa a ser el niño huérfano del sector forestal desarrollado. Hoy esto implica, que el 1.1 % de la madera industrial y el 61% de la leña que se consumen en el país, provienen del bosque nativo y solo el 0.2 % de los 5.000 millones de dólares que genera el sector forestal a través de las exportaciones. Esta situación desfavorable se debe en buena medida a que los bosques nativos no se manejan en forma adecuada.

En los bosques nativos la sociedad espera conservar buena parte como naturaleza y mantenerlos como medio de producción sustentable.

Yo en esta presentación me voy a referir a los bosques nativos y el papel de la silvicultura para conservar los bosques y mejorar su capacidad productiva.

Para un silvicultor el laboratorio son los bosques. Voy a exponer parte, de lo que considero fue importante de mi trabajo y algunos logros obtenidos en las investigaciones realizadas en los bosques de araucaria y de lenga. En estos trabajos contribuyeron varios

colaboradores, un número importante de memorantes para obtener su título y varias empresas como Monte Alto y Forestal Rusfin en Magallanes y entidades como la Universidad de Chile, la Corporación Nacional Forestal (Conaf), el Gobierno Regional de Magallanes, Fondema, Fondef de Conicyt y el Waldzentrum de la Universidad de Münster de Alemania, quienes me apoyaron y financiaron estos trabajos.

Silvicultura

La silvicultura cuenta con una amplia gama de posibilidades para manejar los bosques. A pesar de ello la experiencia al respecto en los bosques en Chile no ha sido favorable. Se ha perdido parte importante de los bosques nativos y se ha degradado en buena medida la productividad de los bosques.

Algunas características silviculturales importantes para la producción forestal en los bosques nativos; la mitad a dos terceras partes de la madera se concentra en árboles viejos y sobremaduros, lo que desde el punto de vista productivo implica problemas como la presencia de pudriciones. Por esta razón estos árboles no se cosechan para producir madera aserrada, a pesar que esta madera defectuosa podría aprovecharse como materia prima para producir tableros y pulpa, además de papel y energía.

La madera es un recurso natural renovable. El crecimiento de los árboles en el bosque depende en gran medida de las condiciones del sitio, la genética y la densidad de los árboles. El mayor crecimiento se puede lograr manejando los bosques con densidades del orden de 30 a 40% menores, que la que impera normalmente se encuentra en los boques naturales. Con la sobredensidad que impera en los bosques nativos, los árboles crecen en forma más lenta. Por lo tanto, en los bosques en los que no se aplica silvicultura, crecen menos y se producen pérdidas importantes de madera. Esto se puede evitar aplicando tratamientos silviculturales para reducir la densidad de los árboles en el bosque.

Investigación en bosques de Araucaria

Partamos con la situación en los bosques de Araucaria araucana. Esta especie se encuentra solamente en Chile y en Argentina. En Chile se conservan 261.000 hectáreas de

bosques. El 50 % de ellos en Areas Silvestres Protegidas (parques nacionales). Como la especie fue fuertemente explotada, en el año 1974 el gobierno prohibió la corta de la especie y se inició un programa de investigación para buscar una solución al problema.

En el año 1980 comencé un programa de investigación, financiado por Conaf- FAO- PNUD de Naciones Unidas. Se estableció el mayor y el único ensayo de manejo silvícola hecho en los bosques de araucaria. En él se analizaron el desarrollo y el crecimiento del bosque bajo distintos tratamientos silviculturales, cortas selectivas, cortas de protección y el bosque testigo sin intervenir. Estos tratamientos de intervención en el bosque se complementaron con una serie de ensayos específicos, en los que se midieron los efectos de los tratamientos sobre la cobertura del bosque, la producción de semillas, la composición y el el crecimiento de la regeneración.

En el tratamiento de **cortas selectivas** se cortó aproximadamente el 30 % de las existencias. El volumen del bosque se reduce de 1.200 a 800 m³/ha. Con esto se logra aumentar el crecimiento de los árboles en 5 m³/ha. Luego en un ciclo de corta cada 20 años se vuelve a cosechar el crecimiento correspondiente al período (el crecimiento de 5 m³/ha por 20 años = 100 m³/ha).

En las siguientes fotos se ven las trozas de los árboles cosechados a orillas del camino y la estructura del bosque. El grado de la intervención apenas es detectable para un especialista. En cambio en los tratamientos más intensivos de corta de protección, la estructura del bosque se ve más abierta.

Los resultados de los ensayos controlados hasta dieciocho años después de las intervenciones, demuestran que en las cortas selectivas aumentan el crecimiento del bosque en un 53% y la regeneración también fue favorable para la araucaria. En cambio, en las cortas más intensivas de protección, el crecimiento del bosque también aumentó, pero la regeneración fue desfavorable en el caso de la lenga.

Otros aspectos importantes fueron que la producción de semillas, los piñones, alimento importante para los pehuenches, aumentó y como la luz que llega al piso es mayor, también las plantas de la regeneración crecieron más.



Pero lo más importante y la conclusión del trabajo fue que en las cortas de protección más intensivas y en la mayor parte de los bosques intervenidos en el pasado se favoreció el desarrollo de coligues y la regeneración de lenga, en desmedro de la araucaria.

Esta situación, que en la actualidad no puede revertirse, debido a que la ley que se dictó en el año 1990 para “proteger” a la araucaria, impide cortar la especie y el manejo de estos bosques. Esto tiene consecuencias negativas para conservar la especie y recuperar los bosques de araucaria. A futuro en estos bosques la densidad de los árboles de araucaria va a disminuir.

Investigación en los bosques de Lenga

Lenga es el Tipo Forestal más importante en Chile. Tiene una superficie de 3 millones de hectáreas, en la Cordillera de los Andes que se extienden desde la Región del Maule hasta el Cabo de Hornos en Magallanes. Los bosques importantes se encuentran fundamentalmente en Aysén y en Magallanes. En ellos se procesa un tercio del consumo de madera industrial de los bosques nativos de Chile y se genera aproximadamente el 70% de las entradas del sector.

Los trabajos de investigación en lenga en Magallanes comenzaron en el año 1978 y se mantienen hasta ahora. El objetivo fue defi-

nir un sistema silvicultural para manejar los bosques. El sistema más adecuado es el de cortas de protección, que consiste en cortas sucesivas en el dosel arbóreo y regeneración bajo la protección del dosel de los árboles.

La siguiente figura corresponde a un esquema del desarrollo del bosque en una rotación de 140 años, que parte de la situación del bosque original, en el que se realiza una corta del 50% de las existencias. La regeneración que se instala bajo la protección del dosel arbóreo alcanza una altura de 3 m por lo que se puede cortar el dosel superior debe ser raleada gradualmente para optimizar el crecimiento de los árboles en altura y en diámetro, como se ve en las fotos siguientes, 30 y 55 años después de la corta de regeneración.

La aplicación del sistema de cortas de protección permitió elevar la cosecha de 80 m³/ha a 130 m³/ha y en el futuro si se manejan los bosques silviculturamente, el rendimiento sostenible se elevara gradualmente a algo más de 250 m³/ha en cada rotación que dura 140 años.

Las consecuencias del manejo de los bosques y el aprovechamiento de la madera de calidad y bioenergía sobre el stock de carbono pueden contribuir positivamente para reducir las emisiones.





Del punto de vista productivo en el bosque se cosechan fundamentalmente trozas aserrables para producir una madera bien cotizada en el mercado internacional. Pero la proporción de madera de calidad en los bosques no manejados es muy escasa - 10 a 20 % de las existencias. Predomina la madera defectuosa de menor calidad que puede ser utilizada como materia prima para producir papel, electricidad, bioenergía y biocombustibles.

Importante para la utilización de la madera es saber que en el proceso productivo forestal anualmente en Magallanes se consumen cerca de 200.000 m³ de trozas y se pierden 600.000 m³ como desecho en los bosques, en los aserraderos y en las plantas de elaboración. Este volumen de desechos que ahora se pierde podría utilizarse como bioenergía para satisfacer todas las necesidades de electricidad y calefacción de la región.

Manejo silvopastoril en los bosques de ñirre y lenga

Un problema importante en Magallanes y en todo el país es el pastoreo del ganado en

los bosques, lo que podría hacerse técnicamente mejor. Los agricultores simplemente “echan los animales” al bosque. En consecuencia se producen daños importantes en la regeneración y en la biodiversidad de las plantas en los bosques. Esta forma de proceder se realiza en varios millones de hectáreas.

Ensayos de manejo silvopastoril en los bosques de ñirre y lenga en Magallanes.

Los bosques de Ñirre en Chile tienen una superficie de 501.000 hectáreas y en Magallanes cubren una superficie de 200.000 hectáreas. En el año 2004 montamos con el Profesor Alfredo Olivares un ensayo de manejo silvopastoril en la Península de Antonio Varas con cuatro tratamientos: Testigo, Raleo, Fajas y Tala Rasa.

Los resultados más favorables se lograron en los bosques raleados, dejando los mejores árboles en pie y bajando la cobertura a un 40%. En consecuencia, el crecimiento de los árboles fue más rápido y con ello se reduce el tiempo de la producción a un tercio, de lo que demoran en los bosques sin manejo.

La producción de la pradera en los bosques raleados de ñirre aumentó al doble y lo más importante fue que la producción de las especies forrajeras aumentó 18 veces, en comparación con el testigo.

El mejoramiento de la oferta de forrajes y de las condiciones climáticas bajo la cobertura de los árboles favorecen el aumento y la producción de carne de los animales.

Este mejoramiento de las praderas y de los animales puede aplicarse en 200.000 hectáreas de bosques de ñirre en la región de Magallanes.



Consideraciones finales

1. Manejar los bosques permite conservarlos, aumentar la producción y hacerlos más sustentables.
2. Para ello se necesita continuar con las investigaciones científicas y tecnológicas.
3. Modificar la legislación para disminuir las trabas para el manejo forestal y el uso silvopastoril de los bosques.
4. Incentivar el aprovechamiento de la madera de baja calidad

Presentado por el Académico
Miembro de Número, **Profesor Juan A. Asenjo**
Presidente de la Academia de Ciencias

Incorporación como Miembro Correspondiente
en Chile de la Academia Chilena de Ciencias del
Instituto de Chile • 19 de junio de 2013

Bioquímica *in Singulo*

Profesor Carlos Bustamante

*Profesor de Biología Celular y Molecular, Física y
Química de la Universidad de California, Berkeley.
Universidad Peruana Cayetano Heredia*

Señor presidente de la Academia Chilena de Ciencias del Instituto de Chile, señores vicepresidentes, señor secretario, señores miembros, colegas, amigos.

Quiero en primero lugar agradecer a los miembros de la Academia de Ciencias del Instituto de Chile por la singular distinción de hacerme miembro correspondiente extranjero de esta institución. En estos momentos quiero empezar haciendo un homenaje a mi amigo y colega, Tito Ureta, quien fue el que propuso mi nombre para mi incorporación a la Academia de Ciencias y quien, lamentablemente, no está ya entre nosotros.

Tito fue tanto científico como pensador de la ciencia. Por un lado su enamoramiento con las isoenzimas que descubrió tempranamente cuando estudiaba con Hermann Niemeyer y por otro su afán por entender el proceso de la investigación científica y el proceso de creación en ciencia lo llevó, ya en la madurez científica, a repartir su tiempo entre la investigación y el ensayo epistemológico.

Científico y forjador de científicos, Tito estuvo siempre a gusto rodeado de sus estudiantes, aconsejándolos, dirigiéndolos y buscando de sembrar en ellos el sentido de la tradición científica, que como todas las tradiciones del quehacer humano va pasando de generación en generación, de anécdota en anécdota, de momento en momento, en las horas compartidas del laboratorio, en los

momentos epifánicos, en los retrocesos ante el resultado experimental contrario a la hipótesis inicial, y en fin en todos los aspectos que pueblan la búsqueda en común que constituye la narrativa de una ciencia nacional. Tito Ureta era consciente de esa narrativa tanto a nivel de la ciencia chilena, como de la ciencia de los países más desarrollados, a la que había accedido durante sus estudios de post-grado en la Rockefeller University donde trabajó con Fritz Lipmann.

Esta galería de fotos que debo más que nada a la gentileza de Elfriede y a Christian Wilson Moya, nuestro estudiante en común, contiene en cierta manera las más sensibles, pues nos muestran a Tito en actividades típicamente académicas: en una conferencia, en su oficina y finalmente a su oficina misma. Aquí con Marilú Cardenas...

En cierto modo fuí el menos afortunado de sus amigos, pues conocí a Tito en persona relativamente tarde, el año 2002, en que vine a visitar Chile y la Universidad de Chile, por primera vez. Pero desde el primer momento en que nos conocimos tuve la impresión que tenían tantos al conocer a Tito: es decir, que estábamos en presencia de una personalidad y una actitud originalísima ante el quehacer científico. Un individuo con intereses y una educación renacentistas, que podía conversar con igual conocimiento de bioquímica como de las óperas de Mozart, de la Lógica

de la Investigación científica de Karl Popper como de Los Versos del Capitán. A través de los años, a través de sus escritos, Tito Ureta fue configurando una personalidad científica única que todos reconocíamos y que a mí, en particular, me hacía irlo a buscar cada vez que visité Chile durante los últimos 10 años.

Estas son dos de sus monografías: “El Hilo de la Navaja de Occam” y “Origen y Evolución de Proteínas y Enzimas”. La primera son una serie de ensayos de carácter epistemológico y teoría de la ciencia y la segunda es su celebrado texto sobre el origen y la evolución de enzimas, tema que lo apasionó toda su vida.

Del primero he extraído este texto: “El ejemplo más espectacular del éxito del reduccionismo como herramienta para entender proviene de la Biología Molecular. No necesito recordarles que Avery McLeod y McCarthy demostraron convincentemente que el DNA es la molécula encargada de la transmisión de los caracteres hereditarios. Con ello, el gen mendeliano deja de ser una concepción teórica, poderosa pero hipotética. Luego Watson y Crick lograron, mediante un descubrimiento genial, dilucidar la estructura del DNA [...] sugiriendo *ipso facto* un mecanismo para la transmisión genética”... “Ya sabemos que las moléculas y sus interacciones subyacen al fenómeno Vida”... por lo tanto afirmo que, eventualmente, los biólogos reduccionistas lograrán identificar los genes responsables de sentimientos que ahora se consideran metafísicos y de las moléculas que producen cultura. El todo es la suma de las partes sí y solo sí nos atrevemos a identificar todas las partes”.

Éstas son afirmaciones que denotan una fe fundamental en el principio de organización jerárquica de la materia y en la posibilidad de comprender el todo como parte de las contribuciones e interacciones de las diferentes partes. Yo me identifico plenamente con esta visión epistemológica de Tito Ureta y pienso que nuestra tarea es principalmente entender las partes en todas sus interacciones para eventualmente entender el todo y sus epifenómenos. Una molécula de gas no tiene presión.... Pero un conjunto de moléculas si presenta “presión”, que la mecánica estadística nos enseña es el promedio en el cambio del momento de las moléculas por unidad de tiempo y por unidad de área al

golpear incesantemente las paredes del contenedor. Del mismo modo, una molécula no tiene “temperatura” pero la misma mecánica estadística nos demuestra que la temperatura macroscópica de un cuerpo es una medida de la energía cinética promedio de sus moléculas. He ahí los fenómenos y sus epifenómenos.

Quiero dedicar los proximos minutos de mi presentacion a Tito Ureta, con quien me siento identificado científica y filosóficamente. El último reduccionismo en biología es estudiar las moléculas biológicas y hacerlo una a la vez.

El estudio de la química y de la bioquímica se ha hecho tradicionalmente siguiendo el método de la asamblea o promedio estadístico. En este método, para estudiar una reacción química, mezclamos típicamente un enorme número de moléculas de tipo A con un número equivalente de moléculas de tipo B y seguimos el curso de la reacción monitoreando alguna propiedad (color por ejemplo) que cambia como resultado de la reacción. Este método ha sido enormemente exitoso y prácticamente todos los resultados de la química y la bioquímica han sido obtenidos de este modo. Pero, a pesar de su solidez, esta metodología implica que lo que observamos es un promedio estadístico de los cambios de la reacción. No seguimos las trayectorias moleculares por las que una molécula de tipo A reacciona con otra de tipo B, sino seguimos *el cambio promedio de una población* de moléculas que efectúan ese cambio cada una a su manera y en su momento; y resulta que los promedios pueden llevar a veces y llevan a menudo a conclusiones equivocadas (Figura 1). Hay un pequeño poema del poeta Chileno, Nicanor Parra que refleja muy bien, creo, los peligros de hacer promedios:

“Hay dos panes.

Ud. se come dos.

Yo ninguno.

Consumo promedio:

Un pan por persona.”

Un lugar en el que entender cómo ocurren las reacciones a nivel de moléculas individuales es importante es en el interior de las células. En efecto, muchos procesos, tales como la replicación cromosómica, la transcripción, la recombinación genética. o la tra-



Multimodal Populations

Averages can be misleading. When you measure a **molecular property** of an ensemble of molecules you may be looking at a homogeneous population or **the** molecules may exist in more than one form:

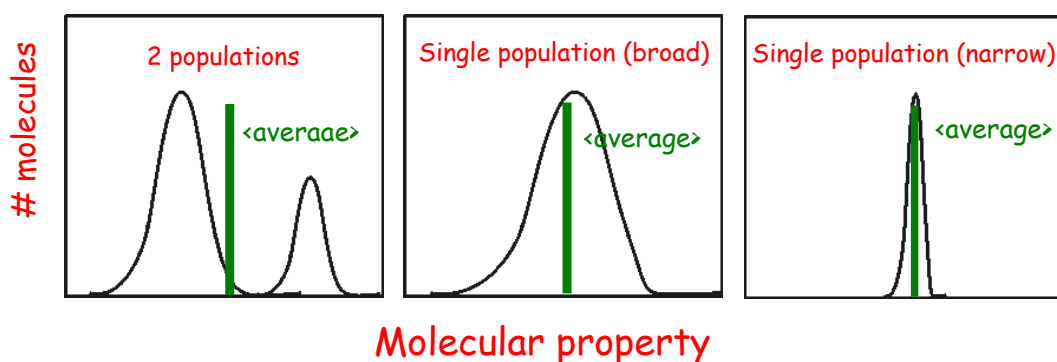


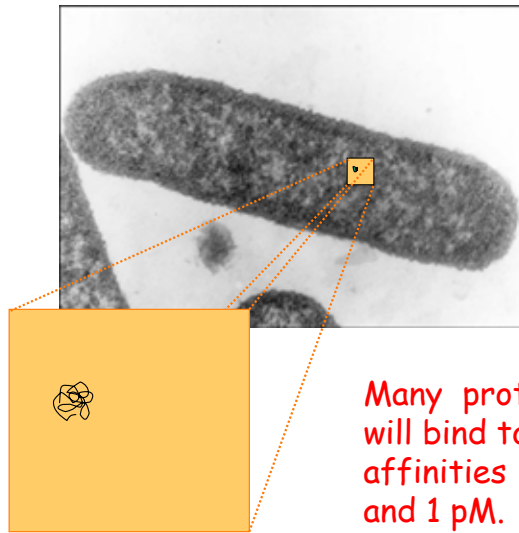
Figura 1.

ducción del ARN. por mencionar solamente algunos, son llevadas a cabo por poquísimas moléculas en el interior de la célula. Un cálculo simple permite establecer que una sola molécula de cualquier tipo en una célula de *E. coli* se halla a concentraciones de 1.6 nM. Dado que muchas reacciones de segundo orden, por ejemplo entre moléculas de proteína y sus sitios de unión en el ADN, tienen constantes de disociación del orden picomolar o aún menor, está claro que basta una sola molécula de cada tipo para asegurar que más del 99% del tiempo éstas moléculas estén formando un complejo entre ellas. En otras palabras, que las reacciones dentro de las células no requieren gran número de moléculas para asegurar que éstas reacciones procedan. Y si esto es así, la pregunta que cabe es: ¿Cómo se comportan dos moléculas, A y B cuando reaccionan entre sí a nivel individual como lo hacen al interior de la célula? (Figura 2)

El camino que llevó a mi laboratorio a desarrollar las técnicas de manipulación de moléculas individuales fue indirecto y, cómo suele suceder en la investigación científica,

su resultado, fue inesperado. En 1988, era yo profesor en la Universidad de Nuevo México, en Albuquerque. Estábamos interesados, mis estudiantes y yo en entender la electroforesis de ADN, que permite separar moléculas de distinto tamaño forzándolas a moverse en un gel de agarosa, por ejemplo, bajo la acción de un campo eléctrico. Lo que hicimos es teñir moléculas de ADN con un intercalador fluorescente que las hace visible bajo un microscopio óptico. Lo que observamos fue que las moléculas se mueven mediante un proceso de reptación en que los extremos de la doble hélice se extienden en dirección del electródo positivo formando una estructura de este tipo $\subset$ y que luego uno de los dos "brazos" de esta estructura (el más largo) tira del otro brazo para convertirlo en la "cola" del reptil. La molécula en estas condiciones se encuentra estirada y era impresionante ver cuán rápidamente la nueva cola del reptil colapsaba por efecto de la elasticidad de la molécula y se formaba un ovillo del cual pronto emergían nuevamente la estructura de dos brazos $\subset$ para iniciar un nuevo ciclo (Figura 3). Estas observaciones nos dieron la

Why Single Molecule Methods?



Many proteins in the cell will bind to the DNA with affinities between 1 nM and 1 pM.

One molecule in an *E. coli* cell (about $1 \mu\text{m}^3$ in volume) is at a concentration of $\sim 1.6 \text{ nM}$.

Figura 2.

Migration DNA Molecules During Gel Electrophoresis



T4 DNA
real-time

Figura 3.

idea que debía ser posible estudiar la elasticidad de moléculas individuales de ADN simplemente tomándolos los dos extremos de la molécula y tirando de ellos.

Los primeros experimentos de este tipo fueron publicados en 1991 y luego en 1992 en la revista *Science* y permitieron caracterizar la elasticidad de la doble hélice a un nivel sin precedentes. Pero quizás el hecho más importante fue que habíamos demostrado que era posible, en principio, manipular moléculas individuales de ADN una por una y cuantitativamente. El resultado fue la formulación de una teoría de elasticidad para la doble hélice basada en el modelo del “worm-like chain” o de la “cadena vermiforme”. (Figura 4)

El proceso de búsqueda que implica la investigación científica es a menudo caótico e impredecible. Las sendas del descubrimiento parecen seguir su propia lógica y a pesar que el investigador quiere pensar que su trayectoria de investigador responde a su propia voluntad y diseño, lo cierto es que la direc-

ción la establece también, en no poco grado el azar y la oportunidad. Los científicos no poseen una bola de cristal y por ello apenas pueden ver un poco más allá que los no iniciados. En mi caso, la demostración que se podía manipular mecánicamente una sola molécula de ADN no hizo necesariamente obvio que éste mismo método podía aplicarse a otros problemas, tales como el estudio de los motores moleculares que trabajan en el núcleo de la célula. Pero el desarrollo de las pinzas ópticas con aplicación a motores moleculares ha hecho que la metodología de moléculas individuales permita obtener información que hubiera sido muy difícil, si en algunos casos no imposible, de obtener por medio de los métodos de asamblea estadística tradicionales. Esta capacidad para realizar experimentos inéditos con moléculas individuales coincidió fortuitamente con el reconocimiento creciente por parte de los biólogos que la célula no es una pequeña bolsa con una solución concentrada de ácidos nucleicos y proteínas en la que tienen lugar reacciones de segundo orden. Más bien, como lo expre-

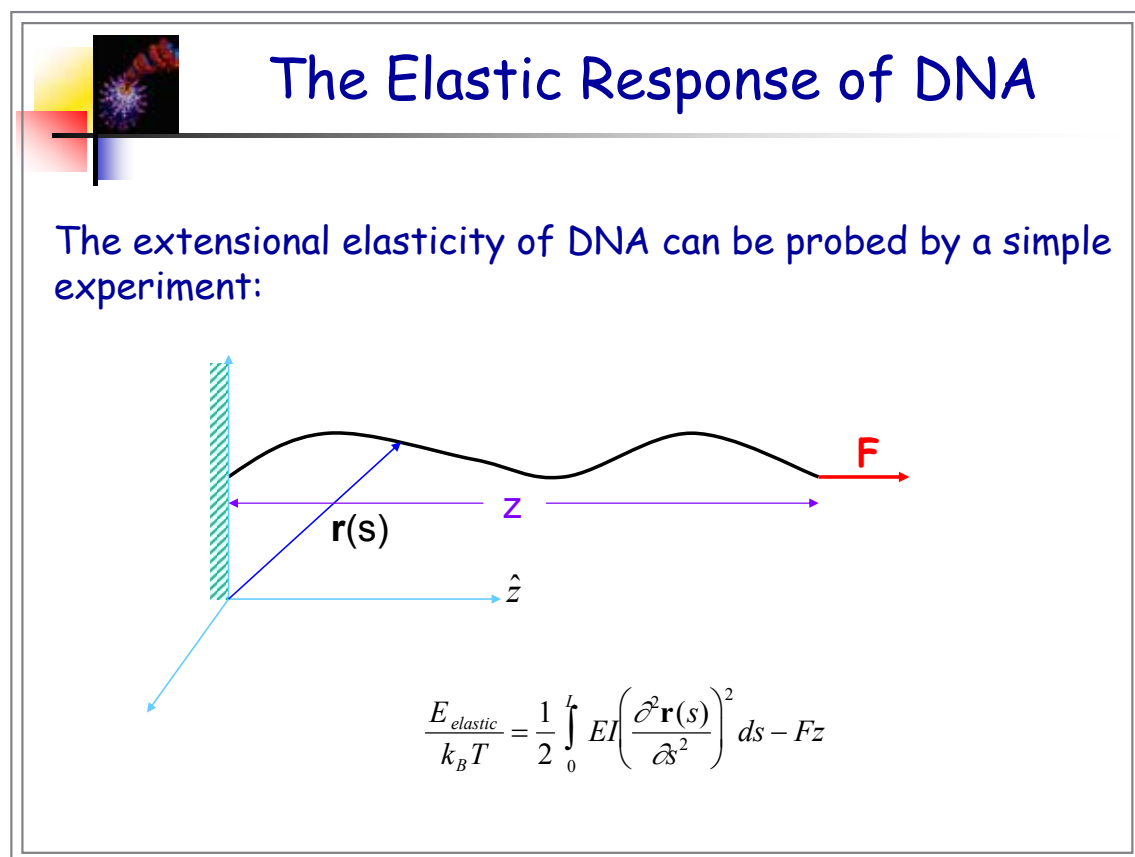


Figura 4.

só en su momento el Profesor Bruce Alberts en un influyente artículo de opinión en la revista *Cell*: “The entire cell can be viewed as a factory that contains an elaborate network of interlocking assembly lines, each of which is composed of a set of large protein machines.” Y es precisamente el caso que las técnicas de moléculas individuales ha permitido el estudio de estas máquinas moleculares, muchas de las cuales funcionan como motores moleculares y por lo tanto como enzimas que convierten la energía libre de una reacción química espontánea en trabajo mecánico, es decir en generación de movimiento y fuerza. Este proceso ha permitido el desarrollo de un capítulo nuevo en la investigación biológica: la bioquímica in *singulo*.

En 1666, Marcello Malpighi escribió en *De Viscerum Structura*: “*La industria operativa de la Naturaleza es tan prolífica que máquinas serán eventualmente descubiertas no solo desconocidas por nosotros sino inimaginables para nuestra mente*”. Malpighi, profesor de la Universidad

de Bologna y fundador de la anatomía microscópica, fue el líder de la revolución que se extendió por las ciencias biológicas en el siglo XVII y que reflejó la revolución paralela que ocurría al mismo tiempo en física. Coincidentemente, durante ésta última, Galileo y Newton refinaron los conceptos de inercia, fuerza y aceleración que permitieron establecer las bases de la cinemática y la dinámica que fueron el lenguaje para describir la operación de máquinas. Coincidentemente, también, en ambas revoluciones la invención de instrumentos que hicieron posible observar y medir aquello que no era directamente accesible al ojo humano, el microscopio y el telescopio, fue el evento que catalizó el desarrollo de la moderna imaginación científica en ambas disciplinas.

Me parece oír la admonición de Tito Ureta: “*Nihil Novi Sul Sole*”.

Muchas gracias.

Comentario

The advent of methods of single molecule manipulation represents a radical change in the traditional ‘in multiple’ methodology of Chemistry and Biochemistry. I will compare these two approaches and argue that the single molecule approach is the most relevant to investigate process inside the cell where often molecules are present in very few numbers. Moreover, these methods make it possible for the first time to directly measure the force and torques generated by the numerous molecular machines responsible of for many of the central processes of the cell. I will present several examples of the use of single molecule manipulation methods to follow in real-time the operation of molecular motors and to measure some important mechanical properties of macromolecules.

“The operative industry of Nature is so prolific that machines will be eventually found not only unknown to us but also unimaginable by our mind.” So wrote in *De Viscerum Structura* Marcello Malpighi (Malpighi, 1666), the founder of microscopic anatomy. Malpighi (1628–1694), a Professor at the University of Bologna, was the leader of the revolution that swept through the biological sciences in the 17th century and that mirrored the parallel revolution that was occurring in physics. Coincidentally, during the latter, Galileo and Newton refined the concepts of *inertia*, *force*, and *acceleration* that establish the foundations of kinematics and dynamics and that became the language to describe the operation of machines. Coincidentally again, in both revolutions, the invention of instruments that made it possible to observe and measure what was not directly visible to the human eye, the microscope and the telescope, became the catalyst that unleashed, in both disciplines, the modern scientific imagination.

Presentado por el Académico
Miembro de Número,
Profesor Rafael Benguria

Incorporación como Miembro Correspondiente
en Chile de la Academia Chilena de Ciencias del
Instituto de Chile • 26 de Marzo de 2014

PROCESOS DE DIFUSIÓN

Profesora Carmen Cortázar

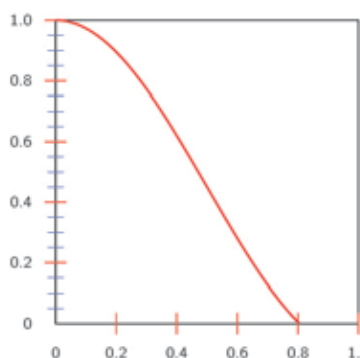
Profesora de Matemática. Facultad de Matemáticas
Pontificia Universidad Católica de Chile

¿Qué es un proceso de difusión?

Comencemos con un ejemplo.

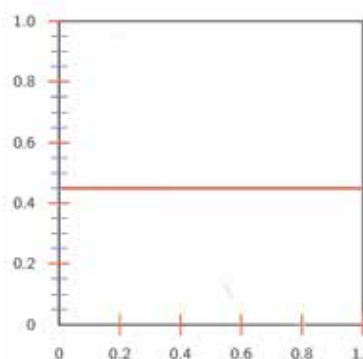
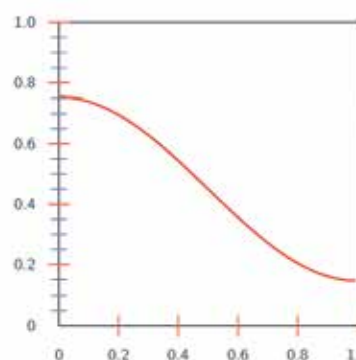
Calor en una barra

Consideremos una barra de hierro aislada, es decir, que no pierde calor por ningún lado.



y supongamos que la curva representa la temperatura en cada punto de la barra en un tiempo $t = 0$.

Queremos saber cuál será la temperatura en cada punto de la barra en tiempos posteriores. Naturalmente esperamos es que los puntos de más calor se enfríen y que los más fríos se calienten.



Si simplificamos las condiciones físicas del problema al máximo, es decir, el aislamiento de la barra es total, la barra es completamente homogénea, que el calor va de puntos de mayor calor a puntos de menor calor y que esto solo depende de la diferencia de temperatura, etc., entonces la temperatura debe satisfacer la siguiente ecuación (ecuación del calor)

$$T_t = (kT_x)_x$$

donde T es la temperatura en un punto x y un tiempo t y k una constante de difusión que depende del material del que está hecha la barra.

Nuestra candidata a solución es una función $T(x,t)$ que satisface la ecuación anterior y que para $t = 0$ toma el valor de la distribución inicial del calor en la barra.

Para estas soluciones se sabe mucho y desde hace mucho tiempo. De hecho, en 1822 la Academia de Ciencias de Francia publicó el trabajo de Fourier “Teoría Analítica del Calor”, donde propone la solución a la ecuación del calor usando Series de Fourier.

El siguiente paso es hacer menos simplificaciones, por ejemplo, no suponer que el material es totalmente homogéneo. En este caso la ecuación es

$$T_t = (k(x)T_x)_x$$

es decir, la constante de difusión k ahora depende del punto sobre la barra.

También la difusión puede depender no sólo de la diferencia del material de un punto a otro sino que puede variar con la temperatura, el gradiente de la temperatura, el tiempo, etc.

$$T_t = (k(x, T, T_x, t)T_x)_x$$

El problema se complica muchísimo.

Otro fenómeno que podemos considerar que la barra se está calentando o enfriando, por ejemplo, le ponemos una estufa. Entonces tenemos una fuente F y la ecuación queda de esta forma:

$$T_t = (k(x)T_x)_x + F$$

Además debemos decir que pasa en los bordes de la barra. ¿Está aislada?, ¿la tenemos a cierta temperatura?, ¿sale o entra calor?

En resumen, necesitamos problemas lo suficientemente sencillos de modo que podamos decir algo al respecto, pero cada vez más complejos, para que representen mejor la realidad.

Otros ejemplos de difusión

Este tipo de ecuación no sólo modela la difusión del calor sino cualquier proceso en que “algo”, una variable, va desde donde hay mayor concentración a donde hay menor concentración. Por ejemplo,

- Si se echa cloro en una piscina, ¿cómo se distribuye el cloro?
- ¿Cuál es la forma de una mancha de petróleo derramado en el mar?
- ¿Cómo se difunde el agua a través de un dique? (Propuesta por investigadores holandeses).
- Se introduce una población de insectos (o bacterias, o cualquier otro ser vivo), ¿cómo se distribuyen dentro de ese habitat? En este caso hay una fuente, ya que la población crece.
- ¿Cómo se difunde en la población una enfermedad luego de los primeros contagios?. En este caso la ecuación probablemente es mucho más complicada.

¿En que consiste nuestra investigación?

Como en muchos problemas que modelan procesos físicos, si no en todos, desde la matemática, un proceso de difusión se puede abordar desde dos puntos de vista.

El primero es hacer un modelamiento de un problema concreto, es decir transformarlo en un problema matemático, del que idealmente se sepan cosas, usar lo que se sabe o lo que se pueda estudiar de él y luego traducir lo que se sabe para dar información sobre el problema concreto.

Un segundo enfoque, al que he dedicado mi vida, es partir de un problema matemático, independientemente del problema concreto que lo inspiró, y generar nueva información. En este segundo enfoque el interés es poner una pequeña pieza en un puzzle universal de conocimiento, un banco de datos al cual recurrir cuando necesitamos información.

Estos dos enfoques son obviamente complementarios.

Habiendo elegido un problema matemático que nos parece interesante, ¿qué queremos estudiar de él?

- Si el problema está bien planteado.

Demos algunos ejemplos de problema mal planteado:

- Damos la ecuación del calor en esta pieza con una temperatura inicial, pero no decimos qué pasa en las pa-

redes. Obviamente no es un problema bien planteado, no hay una única solución.

II. Nuevamente la ecuación del calor en esta pieza, ahora totalmente aislada, y pedimos que la temperatura tienda a cero para tiempos largos. Esto es imposible de resolver, hay demasiados datos que son incompatibles.

Lo que buscamos es un problema que tenga solución y que ésta sea única.

- b. Lo segundo que queremos son ejemplos de algunas soluciones o soluciones explícitas. Esto es lo ideal pero muy difícil.
- c. Estabilidad de las soluciones. Es decir si cambiamos un poquito la ecuación, o las condiciones iniciales o de borde, ¿cuánto cambia la solución? Esto es muy importante para aplicaciones o para hacer aproximaciones numéricas de la solución.
- d. Problemas estacionarios, es decir, una solución en la que la distribución inicial no cambia con el tiempo.
- e. Cualquier información que podamos obtener sobre el comportamiento de las soluciones.
- f. Generalización. Qué otros problemas tienen comportamientos similares.

A continuación describimos algunos problemas en los que hemos trabajado.

Problemas estacionarios

Supongamos que tenemos el siguiente problema en $\mathbb{R}^N$.

$$u_t = \Delta u + f(u),$$

es decir, una difusión con una fuente que depende de la temperatura. Supongamos que u tiende a cero en infinito y que f es una fuente positiva para temperaturas altas y negativa para temperaturas bajas. Pensemos en un problema de combustión.

Lo que queríamos estudiar es si hay problemas estacionarios, es decir, una solución que no cambia con el tiempo y que, por lo tanto satisface

$$0 = \Delta u + f(u),$$

Para soluciones positivas, con f suficientemente suave (diferenciable), había muchos

trabajos que demostraban la existencia, unicidad y simetría radial de las soluciones positivas, en los que f era cada vez más general.

Con Manuel Elgueta y Patricio Felmer [1996 a], [1996 b], [1998]

Nuestro interés era estudiar qué pasaba si f no era diferenciable en 0. Por ejemplo si

$$f(u) = u^2 - u^{1/2},$$

Demostramos que existe una única solución radialmente simétrica y de soporte compacto. Cualquier solución es suma disjunta de esta única solución trasladada.

Con Marta García- Huidobro y Cecilia Yarur [2009], [2011], [2013] y con Jean Dolbeault, Marta García-Huidobro y Raúl Manásevich, (en curso).

En estos últimos años hemos estudiado qué pasa si las soluciones cambian de signo. De este tema había muy poco hecho cuando empezamos. Para operadores un poco más generales, hemos encontrado condiciones en f que garantizan existencia y unicidad de soluciones radiales con un número prescrito de cambios de signo.

Comportamiento de soluciones

Quiero dar ahora algunos ejemplos de trabajos sobre comportamiento de soluciones.

Con Manuel Elgueta [1994].

Por el borde de un recipiente de un medio poroso se introduce gas a una razón dada. La ecuación que modela este fenómeno es:

$$u_t = \Delta u^m,$$

con $m > 1$. Una solución de este problema tiene velocidad finita de propagación. Si partimos con el recipiente totalmente vacío, estimamos, por arriba, el tiempo que demora el gas en llegar a cada punto del recipiente.

Otro de los temas que he estudiado son problemas relacionados con el comportamiento asintótico de las soluciones, es decir, cuál es el comportamiento de las soluciones en tiempos muy largos, o ¿qué pasa con una solución cuando crece demasiado?

Aunque estos son problemas aparentemente muy distintos, están relacionados y

me gustaría reseñar algunos resultados que hemos obtenido.

Supongamos que tenemos el siguiente problema en $\mathbb{R}^N$,

$$u_t = \Delta u^m + u^p,$$

con $m > 1$, $p > 1$ y una temperatura inicial no negativa. O sea, nuevamente se trata de un problema de difusión con fuente, solo que ahora tanto la difusión como la fuente dependen de la temperatura. Sabíamos que se producía explosión, pero queríamos más información al respecto. Este problema es tal que en la mayoría de los casos se produce explosión en tiempo finito, es decir, hay un tiempo T que depende de la ecuación y de la condición inicial, tal que cuando nos acercamos a ese tiempo, el calor en algunos puntos crece tanto que la ecuación deja de tener sentido.

Lo que se sabía era que si $m < p$, es decir, si hay más fuente que difusión para temperaturas altas, se produce explosión en puntos aislados. Por otro lado, si $m > p$, es decir si hay más difusión que fuente, para temperaturas altas, la explosión, si se produce, es en todo el espacio.

Con Manuel Elgueta y Manuel del Pino [1998], [2002].

En el problema anterior, del caso $m = p$ sólo se tenía resultados para dimensión 1 y con técnicas que no eran adaptables a más dimensiones. Sí sabíamos que siempre había un tiempo T , finito, tal que la solución explotaba al acercarse a T . Lo que queríamos saber era cómo y dónde se producía la explosión.

Para esto estudiamos el problema asociado

$$v_t = \Delta v^m + v^m - v,$$

y demostramos nuestra solución u cerca de T el tiempo de explosión se comporta parecido a

$$\frac{w(x)}{(T - t)^{1/m}}$$

donde $w(x)$ es la solución estacionaria, es decir la solución de

$$0 = \Delta w^m + w^m - w,$$

que habíamos estudiado anteriormente con M. Elgueta y P. Felmer.

Para demostrar que u efectivamente se comporta de esa manera tuvimos que demostrar que una solución acotada de

$$v_t = \Delta v^m + v^m - v,$$

cuando el tiempo tiende a infinito, converge, a una solución de la estacionaria

$$0 = \Delta w^m + w^m - w,$$

Este problema nos llevó varios años y creo que es lo más difícil técnicamente que he hecho.

Con Marta García-Huidobro y Pilar Herreros (enviada)

Relacionado también con este problema, determinamos condiciones en f y h para que una solución acotada, no-negativa de

$$v_t = \Delta v + f(v) + h(x, v),$$

converja a las soluciones de

$$0 = \Delta v + f(v).$$

Difusión no- local

En los problemas anteriores la difusión depende solo de lo que sucede en el punto o en un entorno muy chiquito de él. En los problemas no-locales la difusión depende de una vecindad más grande.

Pensemos en una población de alguna especie y que, por el momento, no hay aumento ni disminución de población, solo queremos estudiar cómo se distribuye.

Supongamos que $K(x,y)$ es la probabilidad que un individuo se mueva desde el punto y al punto x . Entonces, si $u(x,t)$ es la densidad de población en un punto x , en un tiempo t , el proceso sería modelado por la siguiente ecuación:

$$u_t(x, t) = \int_{\mathbb{R}^N} K(x,y) u(y,t) dy - u(x,t)$$

Este tipo de ecuación también se ha usado en biología, procesamiento de imágenes, etc.

Por supuesto el proceso depende de $K(x,y)$, o sea, cuál es la probabilidad de que los individuos se muevan desde el punto y al punto x .

El $K(x,y)$ más usado es $J(|x - y|)$. Es decir una probabilidad que depende de la distancia entre los puntos.

El proceso con este K tiene muchas características parecidas a los procesos con la ecuación del calor, en particular tiene difu-

sión instantánea y comportamiento muy similar para tiempos grandes.

Con Manuel Elgueta, Fernando Quirós y Noemi Wolanski [2011], (en curso).

Estudiamos el comportamiento de soluciones para tiempos largos fuera de un dominio acotado en el que $u = 0$.

En este caso conocemos el comportamiento para tiempos largos en espacios de 3 o más dimensiones. Sin embargo, en espacios de dimensión 1 y 2 el problema presenta fenómenos distintos y aún están en estudio.

Con Jérôme Coville, Manuel Elgueta, Salomé Martínez [2007] y con Manuel Elgueta, Salomé Martínez y Jorge García-Melián [2009], [2011], (en curso).

En estos trabajos hemos usado

$$K(x,y) = J\left(\frac{|x-y|}{g(y)}\right) \frac{1}{g(y)},$$

o sea, la difusión depende del punto.

Tanto para el problema de difusión como para el estacionario y en varias situaciones, hemos estudiado el efecto del comportamiento de la función g en el comportamiento de las soluciones.

Con Manuel Elgueta y Julio Rossi [2005].

En este trabajo estudiamos

$$K(x,y) = J\left(\frac{|x-y|}{u(y,t)}\right) \frac{1}{u(y,t)},$$

Es decir la difusión depende de la densidad de individuos en el punto.

Este proceso se parece al de medios porosos y tampoco tiene difusión instantánea.

Hemos continuado trabajando en este problema y esperamos que el comportamiento para tiempos largos sea como el de medios porosos, pero aún no lo hemos podido demostrar para condiciones iniciales de soporte compacto.

Bibliografía

- C. Cortázar, J. Coville, M. Elgueta, S. Martínez, *A nonlocal inhomogeneous dispersal process*, Journal of Differential Equations, 241, no.2 (2007), 332-358.
- C. Cortázar, M. del Pino, M. Elgueta, *Uniqueness and stability of regional blow-up in a porous-medium equation*, Annales de L'Institut Henri Poincaré-Analyse non Lineaire, 19, no.6 (2002), 927-960.
- C. Cortázar, M. del Pino, M. Elgueta, *On the blow-up set for $u_t = \Delta u^m + u^m$* , Indiana University Mathematics Journal, 47 (1998), 541-561.
- C. Cortázar, M. Elgueta, *How long does it take for a gas to fill a porous container?*, Proceedings of the A.M.S., 122 (1994), 449-459.
- C. Cortázar, M. Elgueta, P. Felmer, *Uniqueness of positive solutions of $\Delta u + f(u) = 0$ in $\mathbb{R}^N$, $N \geq 3$* , Archive for Rational Mechanics and Analysis, 142 (1998), 127-141.
- C. Cortázar, M. Elgueta, P. Felmer, *Symmetry in an elliptic problem and the blow-up set of a quasilinear heat equation*, Communications in Partial Differential Equations, 21 (1996), 507-520.
- C. Cortázar, M. Elgueta, P. Felmer, *On a semilinear elliptic problem in $\mathbb{R}^N$ with a non-Lipschitzian non-linearity*, Advances in Differential Equations, Vol. 1, No. 2 (1996), 199-218.
- C. Cortázar, M. Elgueta, J. García-Melián, S. Martínez, *Stationary sign solutions for an inhomogeneous nonlocal problem*, Indiana University Mathematics Journal, 60, no.1 (2011), 209-232.
- C. Cortázar, M. Elgueta, J. García-Melián, S. Martínez, *Existence and Asymptotic Behavior of Solutions to Some Inhomogeneous Nonlocal Diffusion Problems*, Siam Journal on Mathematical Analysis, no. 41 (2009), 2136-2164.
- C. Cortázar, M. Elgueta, F. Quirós, N. Wolanski, *Asymptotic behavior for a nonlocal diffusion equation in domains with holes*, Archive for Rational Mechanics and Analysis, Vol.205(2) (2012), 673-697.
- C. Cortázar, M. Elgueta, J. Rossi, *A non-local diffusion equation whose solutions develop a free boundary*, Annales Henri Poincaré, 6 (2005), 269-281.
- C. Cortázar, M. García-Huidobro, C.S. Yarur, *On the existence of sign changing bound state solutions of a quasilinear equation*, Journal of Differential Equations, 254, no.6 (2013), 2603-2625.

C. Cortázar, M. García-Huidobro, C.S. Yarur, *On the uniqueness of sign changing bound state solutions of a semilinear equation*, Annales de L'Institut Henri Poincaré-Analyse non Lineaire, 28, no.4 (2011), 599-621.

C. Cortázar, M. García-Huidobro, C.S. Yarur, *On the uniqueness of the second bound state solution of a semilinear equation*, Annales de L' Institut Henri Poincaré-Analyse non Lineaire, 26, no. 6 (2009), 2091-2110.

Recepción del Académico Miembro de Número, Profesor Francisco Hervé

.....

Estimadas académicas y académicos. Familiares de Miguel Angel. Amigos, colegas y estudiantes.

Es un gran honor para mi, y un gusto, recibir hoy día en la Academia de Ciencias del Instituto de Chile, al Profesor Miguel Angel Parada, Profesor Titular de la Universidad de Chile. El Profesor Parada recibió su título de Geólogo en 1975 en la Universidad de Chile, y posteriormente en 1982 su Doctorado en Ciencias en la Universidad de Tohoku, Sendai, Japón. Desde 1975 ha trabajado en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, escalando todas las posiciones académicas hasta ser nombrado profesor titular en 1992. Ha realizado numerosos proyectos de investigación FONDECYT, FONDEF, PBCT, FONDAP, así como proyectos internacionales con Japón, Argentina, Brasil, Uruguay, USA, España, China y UNESCO/IUGS. En la actualidad es Sub director del Proyecto CEGA (Centro de Excelencia en Geotermia Andina) asentado en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile e Investigador Principal de la línea Sistemas Magmáticos de dicho Centro. Ha realizado de manera ininterrumpida docencia de pregrado y postgrado en el Departamento de Geología desde 1975, siendo Profesor de un centenar de exámenes de Memorias de Título de Geólogo, Magister y Doctorado

Como parte de su carrera académica ha desarrollado una amplia trayectoria de servicios a la comunidad, manifestadas entre otras en el hecho de haber sido Presidente del Colegio de Geólogos de Chile, Director del Departamento de Geología en al menos 4 períodos, Director del Programa de Doctorado y Magister en Geología en varias oportunidades, miembro del Grupo de Trabajo de Ciencias de la Tierra de CONICYT, Presidente del XIII Congreso Geológico Chileno, miembro de la Comisión de Evaluación Académica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, de la que es hoy día Presidente. Pocos podrán exhibir una tan fructuosa actividad conjunta, académica y de administración superior.

Corresponde aquí centrarse prioritariamente en la vida académica de Miguel Angel. He tenido la suerte de estar cercano a ella desde un comienzo. Inspirado por una lectura de Anna Heitannen que hubo de presentar en un curso de Petrología Avanzada dictado por el Profesor Luis Aguirre aquí presente, manifestó su interés por estudiar temas relacionados a las rocas graníticas. Chile es un territorio con múltiples opciones de realizar ese tipo de estudios, y así fue como la Sección de Petrología le propuso realizar su Memoria de Título en el Batolito de Panguipulli. Hay que situarse en la época, 1972: en ese entonces no existía camino de automóvil por

la ribera N del Lago Panguipulli que uniera Choshuenco con Panguipulli. A Choshuenco se llegaba vía Lago Calafquen y Liquiñe. En las cercanías de Panguipulli, situado en el extremo occidental del lago homónimo se observaba la presencia del margen de un gran intrusivo granítico, cuyas características y extensión hacia el este eran poco conocidas. La alternativa al camino era el bote, y se decidió que ese recorrido lo hiciera Miguel Angel en un bote de goma, a remo, que se adquirió con los escasos recursos de investigación de que disponía el Departamento, en esas eras pre-FONDECYT. También fue necesario buscar un ayudante de terreno adecuado para acompañar a Miguel Angel, y se tuvo la suerte de poder invitar a Marcial Vergara, en ese entonces destacado atleta, quien aceptó la misión de remar el bote en ese trayecto de unos 40 kilómetros. Recuerdo que con Don Luis Aguirre, fuimos a dejar a Miguel Angel a su terreno, en un viejo jeep del Departamento de Geología. La jornada desde Santiago hasta Panguipulli era de dos días, y la segunda noche estábamos acampando cerca del lago. Hicimos una prueba de inflar el bote de goma, reventándolo a la primera en un clavo que emergía de una pasarela. Fue ocasión para Marcial y Miguel Angel de practicar la reparación del bote, antes del zarpe. Al día siguiente, corría fines de Enero, fuimos a dejarlos a la comisaría de Carabineros de Choshuenco, y nos despedimos de ellos con bastante aprensión. El acuerdo fue que iríamos a buscarlos a principios de Marzo, en algún lugar de la costa N del lago Panguipulli, lo más cerca posible del pueblo homónimo. Y eso hicimos. Recuerdo muy bien que íbamos, esta vez con un geólogo colombiano que hacía su doctorado en el Departamento, por un arbolado camino que conduce a la Punta Peters desde Panguipulli. A lo lejos divisamos una pareja que caminaba, románticamente tomada de la mano. Con agradable sorpresa constatamos que eran Miguel Angel y Cecilia, su actual esposa, que vivía con sus padres en ese lugar del lago Panguipulli. De esa manera se ha mezclado en su vida posterior geología y familia.

El título de la presentación que hará a continuación Miguel Angel, "Plutones y volcanes: descifrando reservorios de magma", nos enfrenta a uno de los temas centrales de la geología, que abunda en denominaciones

de procedencia divina: plutónicas se refiere al ámbito del dios Plutón, el dios romano del inframundo, así como volcánicas al dios Vulcano, el dios romano del fuego.

El estudio de las rocas graníticas ha sido y es un tema central de la geología, una de las claves en la comprensión de los mecanismos que gobiernan el funcionamiento de la Tierra. Dio origen a una tremenda batalla conceptual, desatada a fines del s XVIII y que aun tiene algunas escaramuzas. En muchas de las montañas de la Tierra, se observa cerca de su base a rocas graníticas. Ello fue interpretado por el geólogo alemán Gotfried Werner, como resultado de la precipitación de esas rocas a partir de un océano primordial, de composición muy diferente a la del océano actual. A esta visión, denominada Neptunista – otro Dios romano, el que habita en un reino de castillos dorados en el fondo del mar- se opuso y terminó por imponerse como concepto, el uniformitarianismo, expresado esencialmente por Charles Lyell en 1835 en su libro *Principles of Geology*. En él se establecía el principio que la interpretación de la historia de la Tierra debía hacerse a partir de los procesos observables hoy día, lo que imposibilitaba la existencia de ese océano primigenio de Werner. Los granitos se relacionaron desde ese entonces con los volcanes, pero esa relación es variada y compleja.

Miguel Angel desde su memoria en Panguipulli se dedicó a estudiar los batolitos graníticos en diversas regiones del país. Se interesó esencialmente en los procesos de formación que revelan esos cuerpos. El Prof. Jorge Muñoz Cristi, quien también fue miembro de esta Academia, legó una detallada descripción del Batolito de la Costa de Chile Central rocas en las cuales Miguel Angel supo llamar la atención acerca de los procesos de mixing y de mingling de magmas reflejados en las rocas. Los resultados de la investigación de Miguel Angel estarán permanentemente ligados al entendimiento de los procesos que se verifican en las cámaras magmáticas- mixing, mingling, mecanismos de ascenso, emplazamiento, exhumación – de los plutones resultantes. Para ello fue incorporando progresivamente a la observación metódica de terreno, métodos de geoquímica de roca, geoquímica mineral, geoquímica isotópica, geocronología, termo-

cronología. Un resultado: la Cordillera de la Costa de Chile central comenzó a formarse hace 90 millones de años.

También investigó las relaciones existentes entre la generación y emplazamiento de los magmas que originan los granitos, y los procesos de mineralización de Cu y otros metales. Este tema es de magno interés para la economía de Chile. Un resultado: la relación entre las rocas portadoras de la mineralización del yacimiento de Cu gigante Los Pelambres y las adakititas, rocas ígneas formadas por la fusión de rocas de la litósfera oceánica. Las fuentes de los metales serían las rocas oceánicas de la dorsal de Juan Fernández subducidas bajo el yacimiento hace 10 Ma. Este resultado ha interesado a investigadores de todo el mundo, siendo muy citado en bibliografías y requeridos los autores como evaluadores de trabajos sobre adakititas y yacimientos.

Miguel Angel consideró en la década de los 90, que en el Departamento de Geología se debería usar más la capacidad de nuestros estudiantes para utilizar herramientas físicas y matemáticas en el análisis y solución de problemas geológicos. Desde ese momento, fue impulsor de la creación y aplicación de modelos matemáticos a los procesos magmáticos e hidrotermales, y bajo este influjo, se realizaron tesis y trabajos de gran originalidad e impacto. Entender la gran diversidad de mecanismos que desencadenan erupciones volcánicas, así como el amplio espectro composicional que exhiben las lavas emitidas por un volcán, son desafíos permanentes de la petrología y volcanología y constituyen la base para entender los sistemas geotermales y los recursos energéticos asociados.

Con estas sólidas bases, Miguel Angel ha contribuido muy centralmente a la puesta en marcha de la línea Magmatismo y Sistemas Geotermales. A pesar del alto potencial geotérmico que tiene el país, con centenares de volcanes activos, los sistemas geotermales han sido poco estudiados. Mediante la obtención y gestión de recursos económicos provenientes de la empresa y de proyectos financiados por los ministerios de Minería y Energía se puso en marcha un plan estratégico de desarrollo de investigación en geotermia en el Departamento de Geología. Dicho plan incluyó la contratación de investigadores postdoctorales, la adquisición de equipos analíticos y culminó el año 2011 con la generación del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) mediante la obtención de un proyecto FONDAP. En sus dos años y medio de vida, el CEGA se ha convertido en un referente en la disciplina, y se han instalado laboratorios de isotopía, geocronología y geoquímica de rocas y fluidos de clase mundial.

La influencia de los trabajos científicos de Miguel Angel en el nivel con que las rocas magmáticas estudian en el país, es el legado que ofrece a la comunidad geológica, y que junto con los otros aspectos de su trayectoria esbozados aquí, justifican ampliamente su incorporación a la Academia de Ciencias.

PLUTONES Y VOLCANES: DESCIFRANDO RESERVORIOS DE MAGMA

Profesor Miguel Angel Parada

Profesor Titular del Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias, Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile

Me siento muy honrado haber sido seleccionado para integrar tan prestigiosa institución como es la Academia Chilena de Ciencias. Gracias a todos sus miembros. Mi vida académica se ha desarrollado íntegramente en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile. No puedo estar sino agradecido de esta institución que sin dudas es la referente nacional e internacional en el cultivo de la geología. De sus excelentes estudiantes me he nutrido permanentemente ya sea en la sala de clases o como supervisor de tesis. Recientemente, mi actividad científica está ligada al Centro de Excelencia en Geotermia Andina, creado como un proyecto FONDAF de CONICYT. En el ámbito personal, los integrantes de mi familia, particularmente Cecilia, mi señora, Cecilia y Claudia mis hijas han jugado un rol fundamental.

Mi aventura científica se inició como alumno memorista de la carrera de Geología en un tema petrológico de las rocas del lago Panguipulli. Durante esa etapa se fortaleció mi vocación por la petrología ígnea, disciplina que hasta la fecha cultivo con pasión. Las investigaciones la he desarrollado utilizando múltiples enfoques metodológicos, desde las observaciones en terreno, siguiendo con análisis mineralógicos geoquímicos e isotópicos y terminando con modelaciones numéricas en un intento por simular los complejos procesos que ocurren en los reservorios magmáticos.

Mis estudios en rocas plutónicas aportaron a conocer el origen de las unidades plutónicas en Chile central-sur. En particular, se detectó que la fuente de los magmas cambiaba en el tiempo y el espacio hacia rocas más primitivas. Estudios más locales de sistemas plutónicos permitieron determinar los cambios físicos y químicos que sufren los magmas antes de cristalizar totalmente. Las aplicaciones de la petrología de rocas plutónicas a la mejor comprensión del origen de yacimientos minerales y de los sistemas geotermiales han sido también preocupación de mis investigaciones. Cabe destacar la investigación realizada para entender el origen de las rocas y metales asociados al yacimiento gigante de Cu Los Pelambres. En ese estudio se vinculó al segmento de la dorsal de Juan Fernández que se subductó bajo los Andes, como fuente de los magmas que originaron dicho yacimiento. Recientemente, estamos realizando estudios en el Plutón Caleu (Chile central) que demuestran que tuvo una larga historia tardi-magmática, revelado por estudios de zircones. Estos estudios nos permitieron registrar largos intervalos de cristalización de hasta 2.6 millones de años, a la escala de muestra. Igualmente, registraron rangos de temperatura entre 700 y 850°C. Estas heterogeneidades cronológicas y termiales a escala de muestra se explican por la cristalización de zircones a partir de líquido residual extraídos y transportados sucesiva-

mente por diques a los niveles superiores del plutón.

Los estudios en curso y realizados en volcanes, se han centrado, principalmente, en los Volcanes Villarrica y Quetrupillán y en los centros eruptivo pequeños de Caburga con el objeto de terminar las condiciones pre-eruptivas tales como temperatura, presión y contenido de volátiles antes de la erupción. Los resultados más novedosos se obtuvieron en el estudio de la Ignimbrita Licán, que se formó por un evento eruptivo catastrófico hace 13,000 años que generó depósitos piroclásticos de 10 km³ y cubrió un área de 1000 km². Esta erupción fue una interrupción en la historia tranquila de erupciones de este volcán. Los fenómenos que explicaron esta erupción catastrófica habrían sido también excepcionales: un calentamiento del reservorio por la llegada de otro magma y el

retiro glacial al momento de la erupción. La combinación de ambos fenómenos nos permitió explicar el aumento de temperatura registrado en algunos minerales y la desgasificación en las etapas finales de la erupción. Las implicancias que tiene conocer las condiciones que tenía el reservorio antes de una erupción, se vincula a una mejor evaluación del riesgo volcánico en áreas aledaña al volcán. Adicionalmente, permite aportar conocimiento clave para definir la fuente de calor magmático en sistemas geotermiales de alta entalpía. En otras palabras los estudios que he realizado en centros volcánicos dan cuenta de las dos caras de la moneda que tienen los volcanes: las catástrofes vinculadas a su construcción y el beneficio humano que podemos extraerles.

Presentado por el Académico
Miembro de Número,
Profesor Tomás Cooper

Incorporación como Miembro Correspondiente
en Chile de la Academia Chilena de Ciencias del
Instituto de Chile • 30 de abril de 2014

MEJORAMIENTO GENÉTICO DE ESPECIES VEGETALES: EL CASO DEL DURAZNERO.

.....

Rodrigo Infante Espiñeira
Ingeniero Agrónomo.
Profesor Titular.
Universidad de Chile

1. Origen de la Especie y Germoplasma

1.1. Centro de origen de las especies frutales

Las especies frutales cultivadas se originaron y domesticaron básicamente en cinco centros alrededor del mundo: El Centro Mediterráneo (palma datilera, olivo, vid, higuera, granado); el Centro de Asia central (frutales de pepita y de carozo); los centros de China y sudeste asiático (duraznero, cítricos, banana y plátano, mango, caqui, kiwi); y el Centro americano (frutilla, moras, arándano, piña, palto, papayo) (Janick, 2005). Los Centros de Origen, de domesticación y de desarrollo temprano de las especies frutales coinciden con zonas de montaña, o de geografía diversa, condiciones que permiten que se desarrollen naturalmente en áreas acotadas, condiciones climáticas y de suelos muy diversas, que favorecen la expresión de la máxima variabilidad genética y del endemismo de las especies vegetales que la habitan.

Los trabajos científicos pioneros que propusieron la existencia de los Centros de Origen de las especies cultivadas fueron hechos por el genetista ruso Nicolás Vavilov, quien fue miembro correspondiente de la Academia de Ciencias de la ex URSS. El profesor Vavilov, durante el primer cuarto del siglo XX, estudió sistemáticamente las plantas cultivadas del

mundo, a través de muchas expediciones de colecta de material genético y de toma de datos sobre las técnicas primitivas de agricultura en diferentes partes del mundo (Crow, 2001).

En la actualidad, los trabajos de Vavilov mantienen la vigencia de un trabajo científico sistemático y sólido, y actualmente son valorados porque se refieren a los problemas globales actuales como la pérdida de diversidad biológica, la fractura de los ambientes y el cambio climático. Desde el punto de vista del mejoramiento genético, los Centros de Origen son la fuente primaria en donde los investigadores dedicados a esta área, deberían apoyarse. En un programa de mejoramiento genético de plantas (PMG), es condición fundamental conocer la base genética del material del que se dispone, si lo que se busca es generar nuevos genotipos superiores. Así por ejemplo, se puede definir con mayor exactitud cuales individuos son los más aptos para ser cruzados con otros para obtener una descendencia mejorada.

El método clásico para clasificar las especies vegetales es mediante el estudio de la forma de sus órganos característicos, ya sean éstos vegetativos (hojas, brotes) o reproductivos (flores, frutos). Hoy en día, además del estudio de la morfología o del fenotipo, es posible conocer la diversidad genética de

una colección de plantas a través del estudio de la segregación de un marcador molecular. Por ejemplo, uno de nuestros estudiantes (Donoso et al. 2008), evaluó la diversidad genética de variedades de damasco (*Prunus armeniaca*) de diferentes orígenes, utilizando para ello marcadores moleculares de tipo micro-satélites (SSR). De acuerdo con las distancias genéticas entre los genotipos estudiados, se identificaron cuatro grupos, en que algunos de ellos están asociados a centros de desarrollo temprano del cultivo. Estos grupos fueron: 1) Europa Occidental, 2) América del Norte, 3) Mediterráneo y 4) un conglomerado que incluye variedades de diferentes orígenes. Los resultados muestran que las variedades estadounidenses comparten un fondo genético común, como la mayoría de las variedades de Europa, lo que sugiere que su mejoramiento se ha basado principalmente en la hibridación recurrente entre genotipos locales. En el grupo 4 se observan juntas variedades desarrolladas en programas muy distantes unos con otros, y esto es previsible en cuanto particularmente en los últimos años, la tendencia del mejoramiento genético vegetal es al libre intercambio de germoplasma entre los PMG de todo el mundo.

1.2. Las rutas “migratorias” del durazno

Si consideramos al género *Prunus*, donde encontramos al duraznero, al damasco, al ciruelo, al almendro y al cerezo entre las especies cultivadas, su origen, como vimos está en Asia central y en China y el sudeste asiático. Entonces, ¿Si el duraznero proviene de China, porqué se llama *P. persica* o bien por qué el damasco se llama *P. armeniaca*? Simplemente por un error. Estas especies llegaron al occidente a través de las rutas de expansión imperial. De hecho, en estos dos casos se le atribuye a las campañas de Alejandro Magno (356–323 AC), su introducción al Mediterráneo. El duraznero se habría traído de Persia (Irán) y el damasco de la actual Armenia, aun cuando hoy es claro que estos territorios eran sólo estaciones de paso o de desarrollo posterior de las especies, pero no su Centro de Origen. Así los cronistas clásicos como Plinio, Cato o Columella, las clasificaron erróneamente. De hecho, la domesticación del duraznero se remontaría a 3.300 a 2.500 AC en China, y existe mención del durazno en la literatura china ya en el 1.000 AC (Faust y Timon, 1995).

Según Plinio, el duraznero se cultivaba en Grecia ya en el 332 AC. Probablemente fue introducido en Persia desde China como semilla. Es interesante mencionar que el duraznero, a diferencia de la mayoría de los demás especies del mismo género, se auto fecunda en un porcentaje alto, por lo que una planta derivada de semilla mantiene, en gran medida, las características de la planta madre (Janick, 2005).

Durante el imperio romano, el duraznero fue “migrando” y colonizando los demás países europeos, pero por razones climáticas, su cultivo prosperó principalmente en el área del Mediterráneo, aún cuando también llegó hasta Gran Bretaña. Mucho después, en el siglo XVI, fue introducido por los españoles a Norteamérica pocos años después de la llegada de Cortés a México. En la misma oleada “migratoria” se estableció en el sureste de Estados Unidos. Así en los siguientes 200 años (siglos XVI, XVII y XVIII), el duraznero fue alcanzando a los países del cono sur de América. La dispersión se produjo por las semillas de los primeros ejemplares establecidos en México, como también por las nuevas introducciones realizadas desde España, muchas veces a manos de las órdenes religiosas que acompañaron a los nuevos asentamientos humanos europeos en América del Sur.

En 1850 tuvo lugar un hecho significativo para el mejoramiento genético del duraznero y para el desarrollo de su cultivo en el mundo. Desde China se introdujo a EEUU material genético adaptado a las zonas climáticas más cálidas de cultivo de la especie. De estos materiales originales, se obtuvieron progenies de polinización abierta, y así se desarrollaron las variedades fundacionales del duraznero moderno, como ‘Georgia Bell’ y ‘Elberta’. Estas variedades tenían una mejor calidad que las antiguas introducidas por vía de los españoles al sureste de EEUU. Los individuos descendientes de este material traído desde China fue la base de la moderna industria del durazno de EEUU, de Europa y de América del Sur (Scorza y Okie 1990).

1.3. El desarrollo de la fruticultura en Chile

La fruticultura en Chile muestra algunos hitos importantes en su consolidación como sector relevante de la economía nacional, la cual alcanzó en 2013 un valor de US\$ 4.070 millones por las exportaciones de fruta fresca.

Existió un desarrollo inicial impulsado por algunos empresarios privados, donde destaca el señor Salvador Izquierdo a fines del siglo XIX e inicios del siglo XX, quien a través del vivero de su propiedad, Santa Inés de Nos, propagó una serie de variedades modernas de las diferentes especies frutales. A inicios de los años 20, el Estado chileno, a través del Ministerio de Agricultura, Industria y Colonización, y más específicamente a través del Servicio de Arboricultura y Fruticultura, impulsó el desarrollo de una fruticultura más tecnológica, según un modelo californiano, que ya en esos años mostraba un nivel de desarrollo más avanzado que el chileno. El último hito fundamental, lo constituye la implementación de una política de cooperación impulsada por EEUU en el periodo de la guerra fría, en el marco de la búsqueda de una hegemonía estadounidense en América Latina que se enfrentaba al posible avance del comunismo propiciado por la ex URSS.

En este escenario, el 1951 se firmó el primer acuerdo marco de asistencia técnica entre Chile y EEUU. Uno de sus principales objetivos consistió en coordinar e integrar todos los programas de cooperación técnica. En este marco en 1954, se implementó el “Plan Chillán” que buscaba robustecer las ciencias agrícolas, para lo cual se eligió a la Universidad de Concepción. El convenio universitario entre la Universidad de Chile y la Universidad de California se constituyó como un importante proyecto de modernización universitaria, que estaba en armonía con las políticas estatales de desarrollo educativo y científico. Así nació el “Plan Chile-California”, de 1964, el cual se estableció en el marco de la Alianza para el Progreso, con financiamiento del US-AID. El rector Gómez Millas participó activamente en el desarrollo de las conversaciones, realizando incluso un viaje junto a otras connotadas personalidades chilenas a EEUU en 1961. En esa oportunidad, la delegación chilena se entrevistó con el presidente Kennedy y fueron también recibidos por el congreso norteamericano. La implementación del plan en la Universidad de Chile la encabezó el rector Gómez Millas en un inicio, y posteriormente cuando fue nombrado ministro de educación por el presidente Frei Montalva, lo continuó el rector Eugenio González. El Plan Chile-California

se desarrolló durante 10 años, favoreciendo a 323 académicos chilenos que realizaron actividades de docencia, investigación y estudios de posgrado en la Universidad de California, además 287 académicos californianos participaron en el plan (Quesada, 2012).

El Plan Chile-California aportó en la modernización de la enseñanza de la agronomía, en el avance en las técnicas de cultivo, en la modernización del riego, todos avances que fueron prontamente transferidas al sector productivo. También se introdujeron todas las nuevas variedades de especies frutales, las que en aquella época no estaban sujetas a pagos de royalties por su uso. Sin embargo, el desarrollo del mejoramiento genético frutal local no fue impulsado en el marco del mismo plan. De hecho pasaron 25 años desde el término del Plan Chile-California, antes de que en Chile se iniciara el primer PMG orientado a generar nuevas variedades de duraznero.

2. Mejoramiento genético del duraznero

2.1. Conservación de la variabilidad genética

Desde hace algunos años, en el mundo, la conservación de la variabilidad genética de las plantas, y en particular de las plantas cultivadas, está siendo un tema relevante. Existen instituciones públicas nacionales e internacionales que se preocupan de esta tarea, en el entendido de que la riqueza genética de una especie es un patrimonio de la humanidad. A nivel mundial, según la FAO, existen más de 6.100.000 de accesiones conservadas en 1.308 Bancos de Germoplasma. Estos materiales genéticos, están, normalmente, disponibles a título no oneroso para fines de investigación. En EEUU, por ejemplo, el USDA mantiene colecciones de diferentes especies herbáceas y leñosas en repositorios en diferentes estados. La colección de avellano europeo está en Corvallis, Oregon, la de *Prunus* en Davis, California, y la de macadamias en Hilo, Hawaii. En Chile, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y algunas universidades, como la Universidad de Chile, también mantienen colecciones.

Los materiales vegetales, en estos repositorios, son conservados como plantas completas en terreno, vale decir como huertos, o bien también como plantas in vitro en cá-

maras acondicionadas para su mantención y también como tejidos crio-conservados en nitrógeno líquido (-196°C). La razón de mantener estas plantas radica en el valor único de los genes que poseen, ya que si éstos se perdieran, no existiría forma de recuperarlos para su uso y estudio. De especial interés son los genes relacionados con resistencias a plagas y/o enfermedades, o bien aquellos responsables de la síntesis de compuestos con valor nutricional, o bien genes responsables de características que se hayan perdido en las nuevas variedades, como por ejemplo el aroma floral, los colores intensos de pulpa, etc. Para el mejoramiento genético del duraznero, es de especial interés acceder a genes disponibles en antiguos genotipos chinos que podrían aportar genes relacionados con la calidad de la fruta como los que determinan un alto contenido de azúcar, un mayor tamaño del fruto, la baja acidez de la pulpa, todos ellos caracteres que mejorarían el estándar de las actuales variedades y además podrían generar la diversificación de la oferta de los tipos de duraznos en los mercados.

2.2. El genoma del duraznero

Entre las plantas existe una especie modelo usada para estudios genético y genómicos que es *Arabidopsis thaliana*, y esto es porque es una especie de la familia de las crucíferas, herbácea, fácil de cultivar en laboratorio, con generaciones muy breves de aproximadamente 2 meses y con un genoma diploide bastante pequeño (135 Mb). En especies frutales leñosas, es mucho más difícil hacer estudios genéticos, porque son especies muy grandes, difíciles de cultivar en laboratorio, con fase juvenil larga, algunas poliploides y con genomas grandes. El duraznero es una excepción, ya que la fase juvenil dura 24-36 meses, varios caracteres son de control Mendeliano, y el genoma es pequeño (280 Mb), diploide y de auto polinización. Entonces, dada las características de la especie, el duraznero puede ser considerado como un modelo para las Rosáceas y las especies frutales, en general.

2.3. Propagación vegetativa y mutaciones

Las plantas frutales se propagan vegetativamente, vale decir por injerto, para asegurar la estabilidad fenotípica de la variedad utilizada. La única posibilidad que una plan-

ta propagada vegetativamente no fuese idéntica a la planta original, es que ocurra una mutación. En las especies frutales ocurren las mutaciones, pero su frecuencia es más bien baja. En duraznero son varias las mutaciones que dieron origen a fenotipos diferentes, por ejemplo el carácter “nectarino”, que fue una mutación espontánea que se estabilizó y desde hace algunos años es transmitida a la descendencia por vía sexual (a través de cruza-mientos) en muchos PMG en el mundo. Otra mutación que se estabilizó es el carácter de la pulpa “no fundente”, característica de los duraznos usados en la industria conservera, el cual fue originado por una pérdida del gen de la Endo poligalacturonasa. Esta es la enzima que des-polimeriza la pared celular durante la última fase de la maduración, y que como resultado de su acción, la pulpa se ablanda en postcosecha.

Otra mutación en duraznero, menos conocida pero que nuestro grupo ha estudiado, es la que produce el fenotipo llamado de maduración lenta (slow ripening), la que ya había sido descrito, pero no se conocía su origen genético. En primer lugar, más que un fenotipo de maduración lenta, corresponde a un fruto que no se ablanda, por lo que la denominación más apropiada sería “*non-softening*”. Este fenotipo se caracteriza porque el fruto detiene su crecimiento anticipadamente aún cuando continúa disminuyendo la acidez y aumentando los azúcares en la pulpa. Así el fruto posee una pulpa crocante y firme, mucho más parecida a la de una manzana que a la de un durazno. Alejandra Cifuentes, estudiante de doctorado, está estudiándolo y ya ha determinado que el responsable es un factor de transcripción específico. En este momento se desarrollan los experimentos para conocer la funcionalidad del gen en plantas transgénicas de tomate.

A pesar de estos ejemplos de inestabilidad del genoma del duraznero, su genoma puede considerarse estable, a diferencia del de los manzanos por ejemplo, en los que existen casos como el de una sola variedad original como la “Red Delicious” ha dado origen a más de 100 mutaciones espontáneas, que posteriormente han sido desarrolladas como variedades.

Es posible también aumentar experimentalmente la frecuencia de mutaciones, pero en este caso con el fin de hacer mejoramien-

to genético de la variedad, y no de clonarla. Existen tratamientos mutagénicos químicos y físicos, entre estos últimos está el uso controlado de radiación ionizante como uno de los métodos más estudiados. Hace algunos años trabajamos con aplicaciones de rayos gamma en diferentes especies. En especies frutales los resultados no fueron tan promisorios, pero en *Alstroemeria*, una especie ornamental endémica de Chile, se establecieron las dosis de radiación adecuadas para modificar el genoma (Aros et al., 2012).

En definitiva el duraznero se propaga vegetativamente por injerto, y es lo que los viveros especializados realizan año a año para proveer plantas para los productores de fruta. En cambio, cuando buscamos generar variabilidad genética en la óptica de un PMG, la mutagénesis inducida es una opción que puede ser utilizada en algunos casos.

2.4. Programas de Mejoramiento Genético

El mejoramiento genético sistemático del duraznero se ha realizado en los últimos cien años, básicamente a través de cruzamientos intra-específicos entre individuos superiores, y luego en la progenie se selecciona aquel o aquellos descendientes que superar a los padres, en los caracteres de interés para el programa.

En EEUU, y particularmente en California se inició el mejoramiento genético sistemático del duraznero. Uno de los pioneros más prominentes fue Luther Burbank, quien fue un personaje muy popular en la California de fines del siglo XIX y durante los primeros 20 años del siglo XX. Fue conocido como el “Mago”, ya que desarrolló muchas nuevas variedades de duraznero, ciruelo, papas y plantas ornamentales que dieron un impulso notable a la agricultura local, que fue consolidándose luego de la fiebre del oro. Desarrolló una notable carrera como horticultor y “mejorador” de plantas, muriendo en 1926. Fue, de alguna forma, un pionero de la investigación hortícola, y más específicamente: un precursor de la genética vegetal aplicada (Crow, 2001).

En los primeros años del siglo XX se inició el mejoramiento genético sistemático del duraznero en EEUU, en PMG establecidos en diversos estados como California, New Jersey, Michigan, Arkansas, y Florida, los que

dependían de universidades o del Departamento de Agricultura (USDA). En California, florecieron los PMG públicos como los de Universidad de California y el del USDA de Fresno, y también privados, estos últimos siendo muy exitosos y activos hasta el día de hoy. Con el paso del tiempo, y ya más en la década de los 80, en los PMG privados se consolidó la política del resguardo de la propiedad intelectual asociada a las nuevas variedades y se instauró el cobro de royalties por la explotación comercial de las nuevas variedades de duraznero. Hoy en día, el 100% de las nuevas variedades consideran el cobro de royalties por su explotación comercial, ya sea que ellas provengan de PMG privados como de públicos.

En Europa en los años 60, prosperaron los PMG públicos en Italia y Francia, y en los 90 también se desarrollaron en España, algunos públicos, pero la mayoría financiados por cooperativas de productores de fruta. En América del Sur, el desarrollo ha sido mucho más débil, y asociado más bien a las instituciones de investigación agrícola dependientes de los ministerios de agricultura, así en Brasil existe un PMG desde los 80 en EMBRAPA de Rio Grande do Sul, y en Argentina existe un pequeño programa en el INTA de Mendoza.

En Chile el primer PMG de duraznero fue iniciado en 1998 en la Universidad de Chile en asociación con un grupo de empresas, el cual se mantiene vigente y activo hasta hoy. Es un programa que se ha orientado a la generación de nuevas variedades para el mercado de exportación. Este objetivo se alcanza con variedades que produzcan frutas que puedan ser almacenadas en cámara de frío por, al menos, 40 días y que luego de este periodo, mantengan una calidad sensorial alta. Ya han sido generadas las primeras cuatro variedades de duraznero chilenas, tres nectarinos y un duraznero (Infante et al., 2011a). Actualmente, están siendo desarrolladas comercialmente por los socios privados del programa en Chile. Al día de hoy se ha plantado una superficie aproximada de 150 hectáreas, la cual sigue creciendo, en términos de plantas vendidas. Además, estas variedades están siendo patentadas en EEUU para su futuro desarrollo comercial en California. Además, se están evaluando en Sudáfrica y próximamente también lo serán en Europa.

El valor de este logro, radica en que es la primera vez, desde que la fruticultura chilena existe como actividad económica relevante, que se está exportando conocimiento chileno asociado a la industria y no sólo fruta, como había sido hasta ahora.

2.5. Requerimientos especiales de la industria chilena

La industria chilena de exportación de fruta fresca es diferente a todas las demás industrias nacionales de este rubro, ya que tiene que cumplir con una exigencia elemental y muy compleja. Esta exigencia es que la fruta luego de 40 a 50 días de que es cosechada, debe mantener una alta calidad sensorial. Esta razón es simplemente porque los consumidores de los duraznos chilenos (y de otras frutas frescas también) están mayormente en el hemisferio Norte, a 10.000 o 15.000 kilómetros de distancia y el transporte marítimo desde el puerto chileno hasta el consumidor final, demora ese tiempo.

Los duraznos chilenos de exportación, cuando son comidos por un consumidor en Seattle o en Milán, son de pésima calidad, y no es porque sean chilenos, justamente esto sucede porque no lo son. Las variedades de duraznos que son exportadas por Chile, son casi el 100% de ellas de origen extranjero (principalmente californianos e italianos). Son variedades que fueron concebidas para satisfacer los requerimientos de las industrias locales de esos países, en los cuales los centros de consumo están cercanos al lugar de producción. Por ejemplo, desde Fresno, California hasta Nueva York, el viaje en camión tarda 4 días, o bien desde Palermo hasta Hamburgo, el viaje tarda 24 horas. Así, aunque Italia y California sean estados exportadores de duraznos, como Chile, sus mercados están mucho más cercanos. Por este motivo, Chile debe y debió quizás mucho antes, desarrollar sus propias variedades frutales, no sólo en duraznero, sino que de todas las especies importantes económicamente, como lo hizo y lo sigue haciendo Nueva Zelanda y Sudáfrica.

Así, los objetivos de nuestro PMG fueron primero que las variedades, luego de 40 a 50 días no mostraran los problemas típicos de los duraznos “envejecidos”: pulpa harinosa y/o oscura, lo que los hace incomibles. Pero además de no manifesten estos síntomas de

senescencia, que tengan luego de este tiempo, una excelente calidad sensorial. Así, el grupo se dedicó a buscar formas y protocolos para medir objetivamente los daños producidos durante la postcosecha y la calidad del producto final. Así se generaron protocolos nuevos de evaluación de la “hariosidad” y del “pardeamiento” de la pulpa, a través de métodos muy sencillos, pero que no estaban disponibles. Propusimos un método muy simple para medir el jugo libre generado por la pulpa del durazno cuando es comprimido, simulando la acción de los molares (Infante et al., 2009), y también generamos una escala basada en la diferencia del componente de luminosidad del color de la pulpa entre una fruta recién cosechada y una fruta que ha pasado por un periodo de almacenamiento (Cáceres, et al., en preparación).

Otro factor de importancia mayor en la calidad de la pulpa es su textura. Como requerimos variedades que produzcan frutas que serán consumidas 50 días después de la cosecha, se necesita que éstas se ablanden lentamente. Así, estudiamos cómo se ablandaban los frutos en el árbol y luego de ser cosechados. En primer lugar, validamos parámetros fisiológicos asociados a la madurez de la fruta, que se habían determinado en algunas especies pero no en los *Prunus*. En particular, usamos la diferencia de la absorbancia de la clorofila a en dos longitudes de onda (670 y 720 nm), que son justamente en las cuales la clorofila absorbe energía. Así generamos curvas características de pérdida de la absorbancia de la clorofila de la piel de ciruelas, damascos y duraznos mientras crecen en el árbol (Infante et al., 2011b). Además, en las últimas dos temporadas hemos generado modelos que muestran el cambio de este parámetro, el cual, al igual que la firmeza muestra una evolución característica con una fase de lenta evolución de la madurez, y luego 3 a 2 semanas antes de la cosecha, se produce una rápida fase de maduración. Pero quizás el mayor valor de estos estudios, es que corroboramos que la tasa de ablandamiento del durazno era la misma, independiente de la temporada de evaluación, y que las diferencias eran sólo debidas al genotipo. Esto quiere decir que la tasa de ablandamiento tiene un determinante genético importante y que el efecto ambiental es bajo, lo que hace que sea un carácter candidato para ser mejorado genéticamente.

En temas de textura hemos ido un poco más allá, trabajando con equipos más sensibles no utilizados normalmente en frutas frescas, como el texturómetro. De esta forma, la estudiante de doctorado Loreto Contador está estudiando cómo se comporta la elasticidad, la cohesividad, la crocancia de los tejidos de la pulpa del durazno, buscando así generar perfiles fenotípicos mucho más completos del que disponemos actualmente y en consecuencia que ellos sirvan para realizar estudios de fisiología o bien de genética de estos caracteres.

Así también hemos incursionado en el área del estudio de la calidad sensorial de la fruta, trabajando en dos niveles, con paneles entrenados de personas o jueces y con consumidores. En esta área hemos colaborado con académicos de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas en el desarrollo de los léxicos y de los protocolos para describir la calidad de la fruta fresca.

2.6. La selección asistida por marcadores moleculares en Chile

Existen ciertos marcadores fenotípicos o genotípicos que se asocian a la expresión de otros caracteres y que además se comportan como genes en el sentido de su expresión alélica. Esta asociación se observa como caracteres que son co-segregados en el mismo individuo, ya que son genes que están en el mismo cromosoma y muy cercanos uno del otro. Por ejemplo, cuando un durazno tiene pulpa no fundente (del tipo del durazno conservero), siempre el carozo está adherido a la pulpa; o cuando un duraznero no tiene glándulas en la base de las hojas, exhibe una mayor susceptibilidad al hongo fitopatógeno oidio (*Podosphaera pannosa* var. *persicae*).

La investigación en marcadores moleculares en vegetales se inició en la década de los 70, con las isoenzimas. Sin embargo, en los últimos años la investigación se centró en la molécula de ADN, por su estabilidad y obviamente porque es la base de los genes responsables del fenotipo. En los últimos años, se han desarrollado muchos métodos para visualizar el polimorfismo del ADN y así se generaron diferentes tipos de marcadores moleculares. Éstos cuando son asociados con el fenotipo pueden ser utilizados en la determinación de la variabilidad genética en bancos de germoplasma, en el desarrollo de mapas genéticos,

y en la identificación de genes específicos que puedan ser utilizados en los PMG. Uno de las ventajas que presentan los marcadores moleculares es que no son afectados por el ambiente y que tampoco se afectan por el estado de desarrollo de la planta.

Las especies frutales se caracterizan, en general, por tener desde la germinación de la semilla una fase juvenil, o improductiva, muy larga. En nogal esta fase puede alcanzar los 6 años, en peral 5 años y en ciruelo 3 años. Por lo tanto en un PMG, no es posible seleccionar aquellos individuos superiores (que producen la fruta de alta calidad) en tiempos breves. Para resolver esta limitante impuesta por la biología de la especie, los marcadores moleculares pueden ser de mucha ayuda. El desafío es encontrar algún marcador molecular (SSR, SNP, SCAR, etc.) que exista en abundancia en el genoma que nos interesa estudiar, que sea polimórfico y que sea co-dominante, esto es que se exprese tanto como alelo recesivo, como heterocigoto, y como dominante. Además, y para que sea útil en plantas que tienen una fase juvenil larga como las especies frutales, que el marcador se exprese en una planta recién germinada y que se asocie a un carácter que sólo sea posible observarlo cuando la planta está en su fase reproductiva, o sea cuando produce fruta. Ejemplos de marcadores de este tipo son aquellos que se asocian con el tipo de piel: durazno/nectarino o al color de la pulpa: blanca/amarilla, o al tipo de pulpa: fundente/no fundente. Estos caracteres en duraznero son todos de tipo Mendeliano mono-génicos, vale decir muy sencillos y predecibles y efectivamente ya existen marcadores moleculares asociados a ellos, e incluso algunos están siendo aplicados regularmente en PMG. Actualmente, el mayor desafío es encontrar marcadores moleculares asociados a caracteres más complejos y de herencia poli-génica, que son a fin de cuentas los realmente valiosos desde el punto de vista económico. Estos caracteres complejos, son controlados por varios genes que normalmente están en zonas más grandes del genoma de la planta y también están en cromosomas distintos, estas zonas se conocen como “loci de caracteres cuantitativos” o QTL (Infante et al., 2008).

En esta área la Universidad de Chile participa en el consorcio Biofrutales S.A., que es una empresa tecnológica formada por varias

universidades y empresas del sector, y que tiene como fin generar investigación asociativa. Así con el colega Claudio Meneses de la Universidad Andrés Bello hemos generado un nuevo mapa de ligamiento del duraznero, que está próximo a ser publicado, y que se caracteriza porque tiene un alto nivel de cobertura del genoma y además porque se ha asociado a caracteres complejos, de importancia para la industria chilena y no considerados en otros estudios.

3. El desafío de la producción de fruta en los próximos años

La fruticultura en Chile debería llegar a ser parte importante de la cultura chilena, como lo es la producción de kiwi en Nueva Zelanda. Este país logró posicionar en el mundo una fruta que no era originaria del país, a la que bautizaron kiwi por su semejanza con un ave nocturna icónica, construyendo así en el tiempo, una asimilación de un pueblo con una industria, la cual es reconocida en todo el mundo.

La fruticultura en Chile tiene varias características que la hacen valiosa y merecedora de cuidado. Es una actividad que demanda mano de obra estacional por lo que se adapta a la pequeña y mediana propiedad. Son cultivos arbóreos permanentes, por lo que protegen el suelo y la biodiversidad mucho más que los cultivos anuales, son más amigables con el medio ambiente. La zona frutícola en Chile tiene condiciones edafo-climáticas excepcionales, son pocos los países productores de fruta que tienen veranos con temperaturas moderadas y sin lluvias y agua gravitacional de los deshielos de la alta cordillera, por lo cual muy adecuados a la producción de fruta libre de residuos de pesticidas químicos. El hemisferio Sur produce no más del 6% de toda la fruta de clima templado del mundo y en este escenario Chile es el líder en cuanto a volúmenes exportados. La industria frutícola chilena está enfocada fuertemente al mercado externo, de la producción chilena de durazno y manzana más del 70% es destinado a los mercados externos y de los arándanos más del 90%. Existe un nivel de experiencia y capacidad técnica muy alta. Sin embargo, a pesar de que las condiciones favorables para el desarrollo de la industria frutícola son tan claras, existen muchos problemas y amenazas que deben ser tomadas en cuenta.

Entre los aspectos que deberían ser mejorados está la pobre calidad de la fruta fresca chilena en los mercados de destino, y muy particularmente el durazno. En la solución de este problema, el mejoramiento genético puede aportar mucho, así es que son bienvenidos los recursos estatales y de la industria local para iniciar y/o consolidar iniciativas relacionadas con el mejoramiento genético frutal.

Una debilidad importante del sector de exportación de fruta chilena es que la fruta fresca en general, y en el durazno en particular, es un bien absolutamente prescindible y reemplazable. Corresponde al postre, la guinda de la torta, no es un alimento básico de una dieta, como lo son el arroz, el trigo o el maíz, pero sin lugar a dudas son los alimentos que hacen los aportes más relevantes de vitaminas, fibras y compuestos fenólicos. El desafío de la industria chilena será demostrar lo valioso que resulta consumir de frutas frescas durante todo el año. Cuando se consume fruta, los compuestos con propiedades funcionales que poseen, están mucho más aprovechables que cuando son consumidos a través de suplementos alimenticios y además su consumo produce una sensación de placer que es difícil que la produzca otro alimento.

Otra amenaza es que los mercados de los países desarrollados, y en particular en el europeo, están cada vez más alertas a las huellas de carbono y de agua de los procesos productivos de los alimentos. Asociado a este tema, existe la tendencia de consumo llamada "Km 0", que corresponde a un tipo de comercio donde los productos son comercializados y vendidos en la misma zona de producción, asegurando la genuinidad del producto, mostrándose en contraposición a los llamados "alimentos globales", en los cuales no existiría control sobre los sistemas productivos utilizados, ni en su inocuidad. Esta tendencia, si bien es más propia de una cultura de nicho en Italia, Francia y España, tiene seguidores y podría crecer. En este sentido también existen desafíos en el desarrollo de investigación en logística y transporte, en los llamados empaques inteligentes, y en general en mirar a la industria de manera global *-from farm to fork-*, con especial atención en términos del uso de la energía y en la sustentabilidad del sistema.

En relación a las limitantes internas, la superficie agrícola en Chile está agotada. Sin embargo, se dijo lo mismo en la década del 60, pero siguieron ampliándose en los 80 y los 90. Sin embargo, ese aumento se produjo gracias a la incorporación de terrenos ecológicamente frágiles, como las laderas de cerros para establecer huertos de paltos en la zona de Hijuelas y en otras al noroeste de Santiago. Hoy es evidente que este modelo de crecimiento no es compatible con un desarrollo armónico de un país de la OCDE. También, hemos sido testigos que el agua está siendo el mayor limitante en la expansión de la producción agrícola, o incluso en la sustentabilidad de las plantaciones ya establecidas. Esta situación se observa nítidamente en los valles de sur de la Región de Coquimbo, como Quilimarí y Choapa, donde pequeños productores han perdido huertos completos de paltos, o de la Región de Atacama, donde las pérdidas han afectado principalmente a los productores de uva. Para enfrentar este problema se requiere mejorar la eficiencia del uso del agua de riego a través de tecnología intra-predio, pero también a través de la inversión en obras de ingeniería mayor, como redes de canales y embalses de riego, que permitan alcanzar una mayor seguridad del recurso.

Un factor muy contemporáneo, que es más bien político, es el relativo a las relaciones que debiesen establecerse entre las instituciones públicas que realizan investigación aplicada, como la Universidad de Chile, con las empresas privadas. ¿Cómo construimos una relación sana y equilibrada, en que se generen asociaciones virtuosas universidad-empresa? Esta relación debe orientarse hacia el desarrollo de conocimiento por parte de la universidad, el cual debería ser canalizado por las empresas que co-financian estas iniciativas, pero los bienes y servicios derivados de este nuevo conocimiento debiesen tener impacto en un amplio sector de la economía. Además, que fruto de esta asociación, la universidad no pierda el carácter y esencia de una institución pública, y esto se alcanza asegurando que la retribución que ella reciba derive del desarrollo del conocimiento y no de los beneficios directos devengados por la aplicación de la tecnología. No es fácil esta asociación ni este equilibrio, pero existen ejemplos interesantes en la Universidad de

Chile que deben ser observados, como son los consorcios Biofrutales y AquaInnovo. Sin embargo, debe avanzarse en las definiciones de la forma en que las universidades públicas participen en sociedades, generen empresas tipo *spin-off* o *spin-on* y, en definitiva, gestionen los ingresos generados por el desarrollo de conocimiento.

En relación a la organización de los agentes económicos que participan en la industria chilena de exportación de fruta fresca, también hay factores estructurales que inhiben la consolidación de una industria ejemplar. Existen miradas divergentes de los productores y de los exportadores de fruta, las cuales no convergen en una única que busque alcanzar una calidad alta y uniforme de las frutas chilenas en el mercado. No existe un sello único que garantice de antemano la calidad o un alto nivel de satisfacción del consumidor de esta fruta. En esto, el Estado podría contribuir, considerando el valor estratégico y social de la industria frutícola en las zonas rurales de la zona centro sur del país, como en la economía en general.

4. ¿Cómo orientamos la investigación en mejoramiento genético frutal?

En este escenario de suelo y agua limitante, energía más cara y mayores costos productivos, que demandarán mayor investigación, es plausible prever que la tendencia en la producción de fruta fresca chilena de exportación se orientará hacia una alta tecnificación de los cultivos, utilizando tecnologías que apunten a un manejo integrado de las plagas y enfermedades, con un menor efecto sobre los ecosistemas y sobre la salud de los trabajadores agrícolas. La tendencia debiera orientarse hacia la producción de fruta de excelente calidad y destinada quizás a mercados muy exigentes y con alta capacidad de pago (restaurantes, turismo de cruceros, supermercados de alta calidad) y cada vez menos hacia los mercados masivos (supermercados masivos de bajo costo, alimentación institucional, etc.).

Así las cosas, deberíamos enfocarnos en la generación de variedades de fruta que requieran menor uso de insumos, energía y mano de obra que las actualmente en cultivo, ya que los márgenes del negocio son cada vez más estrechos. Además, las nuevas

variedades de fruta se deberán adaptar a condiciones climáticas cambiantes, con años con veranos cálidos, heladas de primavera o inviernos breves.

Desde el punto de vista del consumidor, estas nuevas variedades de fruta deberían satisfacer las expectativas, cada vez más altas, de un consumidor educado, en particular en lo relacionado con la calidad sensorial y nutricional del producto. Desde el punto de vista de la calidad organoléptica, el consumo de una fruta chilena, que es consumida en invierno por un consumidor del Hemisferio Norte, debiese ser una experiencia sensorial inolvidable, para así “fidelizarlo” al producto chileno. En segundo lugar, la investigación debería dirigirse hacia la generación de nuevas variedades que aporten compuestos con propiedades nutraceuticas (Contador et al., 2011; Infante et al., 2011c), que mejoren la salud del consumidor.

Bibliografía

- Aros, D., Valdes, S., Olate, E., & Infante, R. 2012. Gamma irradiation on *Alstroemeria aurea* G. in vitro rhizomes: an approach to the appropriate dosage for breeding purposes. *Rev. Fac. Cs. Agr.* 44: 191-197.
- Contador, L., Rubio, P., Shinya, P., Meneses, C., Pena-Neira, A., & Infante, R. 2011. Phenolics contents and sensory characterisation of melting and non-melting peach. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 86(3), 255-260.
- Crow, J.F. 2001. Plant Breeding Giants: Burbank, the Artist; Vavilov, the Scientist. *Genetics* 158: 1391-1395.
- Donoso, J. M., Aros, D., Meneses, C., Narvaez, C., & Infante, R. 2008. Genetic relationships in apricot (*Prunus armeniaca* L.) using SSR markers and their implications for breeding. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 6(3-4), 378-382.
- Faust, M. & B. Timon. 1995. Origin and dissemination of peach. *Hort. Rev.* 17:331-379.
- Infante, R., Martinez-Gomez, P., & Predieri, S. 2008. Quality oriented fruit breeding: Peach *Prunus persica* (L.) Batsch. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 6(2), 342-356.
- Infante, R., Meneses, C., Rubio, R., & Seibert, E. 2009. Quantitative determination of flesh mealiness in peach *Prunus persica* L. (Batch.) through paper absorption of free juice. *Postharvest Biology and Technology*, 51(1), 118-121.
- Infante, R., Reginato, G., & Hinrichsen, P. 2011a. ‘Andes-1’: An Early-maturing Clingstone Peach Cultivar for Canning and Fresh Market. *Hortscience*, 46(3), 499-500.
- Infante, R., Contador, L., Rubio, P., Mesa, K., & Meneses, C. 2011b. Non-destructive monitoring of flesh softening in the black-skinned Japanese plums ‘Angeleno’ and ‘Autumn beaut’ on-tree and postharvest. *Postharvest Biology and Technology*, 61(1), 35-40.
- Infante, R., Contador, L., Rubio, P., Aros, D., & Pena-Neira, A. 2011c. Postharvest Sensory and Phenolic Characterization of ‘Elegant Lady’ and ‘Carson’ Peaches. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 71(3), 445-451.
- Janick, J. 2005. The Origins of Fruits, Fruit Growing, and Fruit Breeding. *Plant Breeding Rev.* 25: 255-320.
- Quesada F. 2012. Un modelo para el desarrollo: la cooperación entre Chile y California y el papel del financiamiento público y privado norteamericano. *Estudio Avanzados* 18: 11-34.
- Scorza, R. and W.R. Okie. 1990. Peaches (*Prunus*). *Acta Hort.* 290:177-234.

Incorporación como Miembro Correspondiente
en Chile de la Academia Chilena de Ciencias del
Instituto de Chile • 28 de Mayo de 2014

Recepción del Académico Miembro de Número, Profesor Miguel Kiwi

.....

Para un educador no hay nada mas gratificante que el orgullo por una alumna o alumno que, con el correr de los años, lo supera ampliamente. Fui el supervisor de Dora Altbir en sus trabajos de Licenciatura y Doctorado, y desde entonces ella se ha destacado como investigadora, en el área de la física teórica de la materia condensada. Pero, en paralelo, ha desarrollado una impresionante labor directiva, administrativa y de política científica en la ciencia nacional, lo cual es una afortunada conjunción que se da muy raras veces.

Dora realizó sus estudios de Licenciatura en Física (1979-1984), maestra (1986-1987) y doctorado (1988-2), en la Facultad de Física de la PUC, donde fue distinguida como Mejor estudiante en los años 1984, 1985 y 1986.

De allí pasó a desempeñarse como Coordinadora de Postgrado, P. Universidad Católica de Chile, 1992-1995.

- Coordinadora de Acreditación Institucional, P. Universidad Católica de Chile, 1994-1995.
- Postdoctorado, Universidad de Santiago de Chile, 1995-1998.
- Directora del Centro de Mejoramiento de la Gestión Académica, encargada de la acreditación de Carreras. Universidad de Santiago de Chile, 1996-1998.

- Profesor Asociado, Universidad de Santiago de Chile, 1998-2003.
- Profesor Titular, Universidad de Santiago de Chile, 2003 a la fecha.
- Directora del Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Santiago de Chile, 2006-2009.
- Coordinadora de Acreditación Institucional, en 2008.
- Miembro de la Comisión Nacional de Acreditación, representante del Consejo de Rectores de Universidades Chilenas (2011-2014).

Ha tenido proyectos Fondecyt en forma continua desde 1992 a la fecha.

Ha sido Directora de dos proyectos financiados por la Fuerza Aérea de Estados Unidos.

Fue Directora de dos proyectos Núcleo Milenio.

Entre 2001 y 2005 fue Directora de Proyecto Mecesup, del Ministerio de Educación, para el Desarrollo de Redes en Física a Nivel de Postgrado con la participación de cuatro Universidades del país.

Ha sido Directora del proyecto *Basal Centro para el Desarrollo de la Nanociencia y la Nanotecnología* - CEDENNA, 2009-2014.

Lo notable es que ha hecho todo lo anterior sin postergar su actividad de investigación. En números, ello se manifiesta a través de la dirección de seis tesis de Doctorado, varias de maestra y licenciatura, dos solicitudes de patentes, numerosas actividades de divulgación, 79 publicaciones en revistas ISI, además de varios manuscritos sometidos.

Por todo ello es para mi motivo de mucha alegría y orgullo poder darle la bienvenida a esta Academia de Ciencias del Instituto de Chile, con ocasión de su incorporación como Miembro Correspondiente.

DEL MUNDO NANOSCÓPICO AL MUNDO VISIBLE: UNA TRAVESÍA POR EL MAGNETISMO

Profesora Dora Altbir

Física de la P. Universidad Católica de Chile

Quisiera agradecer al Dr. Miguel Kiwi por sus palabras, muy significativas para mí. Para mí es un honor ser nombrada Miembro Correspondiente de la Academia Chilena de Ciencias y que sea él quien me presente en esta ceremonia. A lo largo de estos años pasé de ser su estudiante de pregrado a su alumna de doctorado. Luego compartimos el desafío de formar un grupo multidisciplinario que trabajara en ciencia y tecnología. Y actualmente colaboramos tratando de responder algunas de las múltiples preguntas que subsisten en nuestra área. Él es y ha sido un referente para muchos científicos del área.

Magneto-resistencia gigante

Quiero iniciar esta charla hablando del descubrimiento de la magneto-resistencia gigante que realizaron, en forma independiente el año 1988, Albert Fert y Peter Grünberg. Ambos recibieron en 2007 el Premio Nobel en Física por haber permitido, a través de este descubrimiento, que se desarrollara la tecnología que hoy es responsable de la miniaturización radical de los discos duros que existen actualmente.

La magneto-resistencia gigante se produce cuando tenemos un sistema de tres capas, dos de ellas de un material magnético, como por ejemplo cobalto, y una de un metal no magnético, como cobre, dispuesta como muestra la figura 1. Estas capas podemos pensarlas como barras de un imán. Si ponemos una con el polo norte apuntan-

do hacia arriba, luego ponemos el cobre, y a continuación la nueva barra magnética, ésta tendrá dos posibilidades en cuanto a la orientación de su magnetización. Que ambos polos nortes apunten hacia arriba, o que uno apunte hacia arriba y el otro hacia abajo. Lo que observaron Fert y Grünberg fue que si el espesor de la película de cobre es del orden de los nanómetros, no existían estas dos posibilidades, sino que la magnetización de ambas barras magnéticas tendría sólo una orientación posible, la que estaría determinada por el espesor de la película intermedia del material no magnético. Una propiedad interesante de estos sistemas es que al pasar una corriente perpendicular a las películas magnéticas, si la magnetización de las dos películas magnéticas es paralela se observa una baja resistencia eléctrica, y si están antiparalelas, la resistencia es muy alta. Esta diferencia en las resistencias que se produce como función del espesor de la lamina del espaciador no magnético si este es de sólo algunas capas atómicas permitió fabricar en 1997 el primer cabezal de lectura extremadamente sensible. Por ejemplo, si el sistema de tricapas se orienta en forma paralela como el que se ilustra en a), presentará una baja resistencia, lo que podemos interpretar como que ha leído un cero, y si es antiparalelo, como en b), tendrá una alta resistencia que entendemos corresponde a leer un 1.

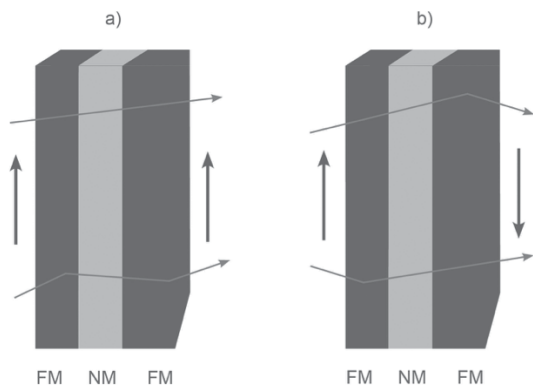


Figura 1: Sistema de tricapas que ilustra un acoplamiento paralelo (a) y antiparalelo (b) de la magnetización de las capas magnéticas

La magneto-resistencia gigante se considera como la primera aplicación real de la nanotecnología. También abrió la era de la espintrónica. La electrónica consiste en el control de la carga eléctrica, y la espintrónica considera la carga eléctrica y el espín del electrón.

Espín del electrón

Quisiera ahora explicar lo que es el espín del electrón, una característica con la que en general no estamos muy familiarizados. El año 1922 Otto Stern y Walther Gerlach realizaron un experimento haciendo pasar un haz de átomos de plata por un campo magnético no uniforme. Este campo produciría una fuerza neta en los átomos que, acorde a la predicciones clásicas, debería desviarlos y producir una gran mancha en el detector. Esto no ocurrió, y se observaron dos manchas con igual intensidad separadas por una sección en la cual no había llegado ningún átomo de plata (ver Fig. 2). Para poder explicar esto hubo que asumir que los átomos de plata tenían una propiedad que llamaremos momento angular que podía tomar dos valores posibles. Esto también era contradictorio con la mecánica cuántica que hasta ese momento indicaba que el número de momentos angulares que podía tener un átomo debía ser un número impar. En 1927 el experimento fue repetido con átomos de hidrógeno, mostrando que este nuevo momento angular provenía de los electrones, tenía dos valores posibles y estaba asociado a lo que se llamó el espín del electrón.

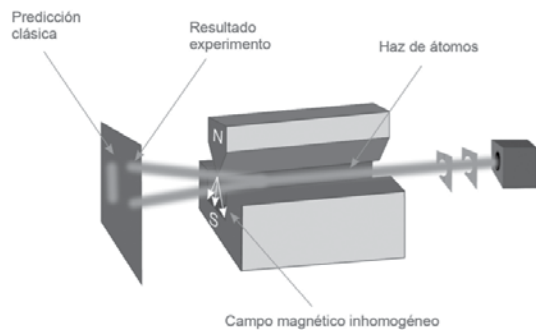


Figura 2: Experimento de Stern y Gerlach

El espín del electrón es una propiedad intrínseca de este, tal como su masa y su carga, y se evidencia cuando el electrón interactúa con un campo magnético. Tiene los valores $+\frac{1}{2}$ y $-\frac{1}{2}$. De esta forma podemos asociar a cada electrón una pequeña barra magnética, con un polo norte y uno sur que coexisten en cada electrón. Si el polo norte apunta en una dirección dada podemos decir que corresponde al electrón con espín $+\frac{1}{2}$, y si apunta en la dirección opuesta, diremos que corresponde al espín $-\frac{1}{2}$. Y como cada espín tiene asociado un polo norte y uno sur, podemos decir que en realidad es un dipolo magnético.

Interacciones

Estos electrones pueden interactuar a través de sus dipolos, tal como lo hacen dos barras magnéticas, en las que si los dos polos iguales están cercanos se repelerán, pero si los polos opuestos están cercanos se atraerán. Esta interacción se llama interacción dipolar magnética, pues es entre dipolos magnéticos. Usualmente es muy pequeña, pero en sistemas de tamaño nanométrico es muy relevante.

Volvamos ahora a la magneto-resistencia gigante. El descubrimiento de este efecto ocurrió el año 1988, exactamente cuando inicié mi doctorado. Mi tutor había conocido en Europa este efecto en el momento en que se descubrió, y al volver a Chile el año 1989 me propuso que trabajáramos en este tema que no se esperaba que concitara gran atención. Sin embargo al poco tiempo, visto el potencial de aplicaciones que tenía este tema, comenzó a ser estudiado ampliamente. La explicación llegó a los pocos años a partir de lo que se conocía como interacción de RKKY que muestra que si hay dos átomos magnéticos, de hierro

por ejemplo, en una caja de un metal, como cobre, los electrones responsables del magnetismo en los átomos magnéticos interactúan de forma tal que sus momentos magnéticos, estos dipolos magnéticos que tiene cada electrón, se orientan paralelamente o anti paralelamente, según sea la distancia que separa a los átomos. Esta interacción se debe a los electrones del metal, que se mueven por toda la caja y pueden llevar información de un electrón magnético al otro.

Si bien realizamos un par de trabajos con la interacción de RKKY, nuestra contribución más importante en este tema tiene que ver con la interacción dipolar. Si uno supone que en el sistema de tricapa las interfases entre las películas magnéticas y la no magnética son perfectas, la interacción dipolar entre las dos películas magnéticas es nula, es decir, la suma de las interacciones de todos los dipolos de una película magnética con la de todos los dipolos de la otra película magnética es cero. Sin embargo resultados recientes mostraban que la interfase entre estos dos materiales no era perfecta sino rugosa. Es decir, átomos del espaciador no magnético se introducen en la superficie magnética y viceversa. Al calcular la interacción dipolar entre las dos películas magnéticas suponiendo que son ligeramente rugosas, es decir, que contienen imperfecciones en las interfases, mostramos que esta interacción es de una magnitud comparable a la de RKKY [1].

Sistemas granulares

En los años 90, ya explicado el origen de la magneto-resistencia gigante en multicapas, comenzaron a estudiarse los sistemas granulares, que consisten en granos de unos 10 nm de diámetro de un material magnético como cobalto, inmersos en una matriz de un metal no magnético, como cobre, en forma desordenada (ver Fig. 3).

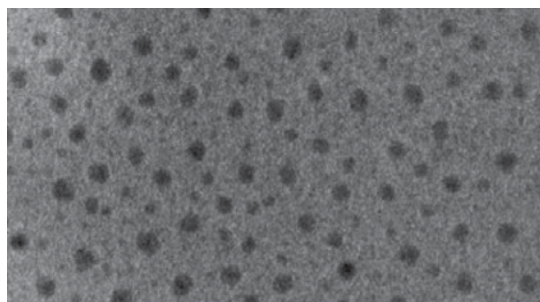


Fig. 3: Ilustración de un sistema granular magnético Cobre/Cobalto

Este sistema también presentaba magneto-resistencia gigante pero existían dudas de que la interacción entre los granos magnéticos fuese de tipo RKKY. Luego de adaptar lo que habíamos realizado con las interfases rugosas a estos sistemas, encontramos que, en este caso, a diferencia de lo que ocurría con las tricapas, la interacción dominante era la dipolar [2].

Sistemas preparados con litografía

Luego de algún tiempo surgió la idea de reemplazar los medios de grabación por un sistema de nanoestructuras preparadas con litografía. La litografía es una técnica que utiliza un conjunto de láseres para generar una máscara con agujeros ordenados en los cuales es posible depositar material magnético y obtener arreglos como los que muestra la figura 4. Cada estructura es de tamaño mayor a un grano, pero menor a una región en la que se graba un uno o cero. Por ello este tipo de sistemas permitiría aumentar la densidad de información grabada. La base de esto es que cada elemento del arreglo muestra dos estados de magnetización, lo que permite entonces asignar un 1 ó un 0 a cada uno de esos estados.

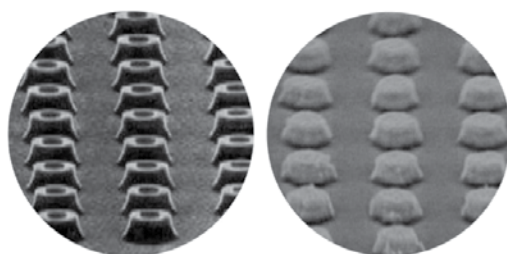


Figura 4: Arreglos de estructuras magnéticas preparadas mediante litografía

A la fecha se han preparado diferentes estructuras con esta técnica, entre éstas hay anillos, cilindros y conos, todos de tamaño del orden de los 100 nm, que presentan al menos dos estados magnéticos que permitan grabar información en base binaria [3,4].

Método de escalamiento

Dado que estos sistemas son de tamaño mayor que los granulares, para estudiarlos debimos desarrollar un método que nos permitiera tratar un gran número de átomos con momentos magnéticos interactuantes. Este

método, conocido como Método de Escalamiento [5] fue formulado originalmente para estudiar los estados de equilibrio de partículas magnéticas cilíndricas de altura h y diámetro d a partir del cálculo de los estados de equilibrio de sistemas de tamaño menor, de diámetro d' y altura h' , tal que $d' = d\chi$, $h' = h\chi$, con $\chi < 1$ y $\eta = 0.55$, si la constante de intercambio J es escalada acorde a $J' = \chi J$. También mostramos [6] que estas relaciones pueden ser utilizadas con simulaciones de Monte Carlos para así obtener el estado magnético general de una nanopartícula.

Nanotubos magnéticos

Hace unos 8 años conocimos los primeros resultados de preparación y caracterización de nanotubos magnéticos. Estos son sistemas muy largos, del orden de las micras, con diámetros pequeños, del orden de las decenas de nanómetros. Al cambiar el ancho de la pared cambia el color. Estos tubos son muy útiles en aplicaciones biológicas, pues al ser huecos son livianos y pueden flotar en líquidos como la sangre [7]. Así es posible transportar algún medicamento, como anti-tumorales, y dirigirlos a un sitio específicos aprovechando su carácter magnético.

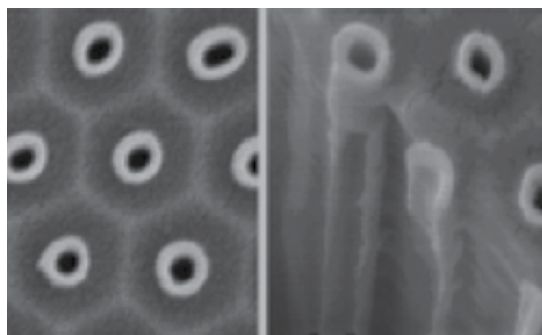


Figura 5. Arreglo de nanohilos magnéticos de óxido de hierro

En estos sistemas realizamos los primeros cálculos numéricos y analíticos para encontrar el estado magnético que muestran en función de su diámetro interno y externo [8], como los modos de reversión [9], que es la forma que adoptan las estructuras para cambiar de un estado de magnetización a otro, así como diversas otras propiedades.

Quisiera terminar diciendo que he estudiado la interacción dipolar por 20 años. Creo también que podré seguir trabajando en ella por muchos años más. En el trabajo

realizado he sido una más dentro de un grupo y he tenido la suerte de interactuar con un gran número de investigadores. Como afortunadamente son muchos, quiero agradecer aquí a todos pero por razones de tiempo me restringiré a nombrar especialmente a aquellos con quienes he realizado al menos dos trabajos y he tenido una colaboración con un fuerte intercambio de ideas.

En orden cronológico, a Miguel Kiwi, quien me introdujo al mundo de los materiales, y con quien tengo la suerte de estar colaborando actualmente. A Ricardo Ramírez y a Iván Schuller, con quienes comencé a interactuar al término de mi doctorado. Luego trabajé con Patricio Vargas y Juan Carlos Retamal, con quienes desarrollamos el método de escalamiento. A José d'Albuquerque e Castro, quien luego de 20 años de trabajo conjunto es tanto mi amigo como mi colaborador. Luego conocí a Mónica Bahiana, José Mejía, Aldo Romero, Eugenio Vogel y Marcelo Knobel, con quienes continué trabajando hasta hoy. Más recientemente Kornelius Nielsch, Detlef Görlitz, Juliano Denardin, Johan Mazo, Samuel Baltazar, David Laroze, y Manuel Vásquez, quienes me introdujeron a nuevos temas que me han ocupado los últimos años.

Quiero agradecer en forma especial a mis estudiantes. A Paul Soto, a quien apoyé en su tesis de magíster. A Juan Escrig, Pedro Landeros y Sebastián Allende, mis primeros estudiantes de doctorado, ahora mis colegas. A Sebastián Castillo, Nicolás Vargas y Roberto Escobar, mis actuales estudiantes, quienes son una fuente permanente de nuevas ideas. A todos ellos quisiera decirles que he disfrutado intensamente el trabajo conjunto. Creo que trabajar con nuestros estudiantes tiene una riqueza enorme en términos de aprendizaje pero también en términos de la generación de fuertes lazos de amistad.

A todos y cada uno de mis compañeros en el Núcleo Milenio y el Centro CEDENNA, dos desafíos que espero perduren muchos años más, y que junto con Fondecyt han financiado mi trabajo. A Erika, Carmen, Verónica y Armando, que nos han apoyado muchísimo con un trabajo silencioso y eficiente.

Finalmente quiero agradecer a mi familia, por el enorme apoyo que me han brindado.

Especialmente a mi madre Sofía y hermana Myriam, que me acompañaron y motivaron siempre, a mi marido Juan Carlos, quien ha compartido conmigo las presiones del trabajo y las alegrías de los resultados, y a mis hijos Moisés y Catalina, quienes han sido y continúan siendo mi principal fuente de motivación.

Referencias

- [1] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, y J. Chazelas, *Physical Review Letters* 61, 2472 (1988).
- [2] P. Bruno y C. Chappert, *Physical Review Letters* 67, 1602 (1991)
- [3] D. Altbir, M. Kiwi, R. Ramírez, e I. K. Schuller, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 149, L246 (1995).
- [4] D. Altbir, J. d'Albuquerque e Castro, y P. Vargas, *Physical Review B* 54, R6823 (1996).
- [5] C. A. Ross, Henry I. Smith, T. Savas, M. Schattenburg, M. Farhoud, M. Hwang, M. Walsh, M. C. Abraham, y R. J. Ram, *Journal of Vacuum Science and Technology B* 17, 3168 (1999).
- [6] J. Mejía-López, D. Altbir, A.H. Romero, X. Batlle, I.V. Roshchin, Chang-Peng Li, I.K. Schuller, *Journal of Applied Physics* 100, 104319 (2006).
- [7] J. d'Albuquerque e Castro, D. Altbir, J.C. Retamal, y P. Vargas, *Physical Review Letters* 88, 237202 (2002).
- [8] P. Vargas, D. Altbir, y J. d'Albuquerque e Castro, *Physical Review B* 73, 092417 (2006).
- [9] Eugenio Vogel, Patricio Vargas, Dora Altbir, and Juan Escrig (2010): *Magnetic Nanotubes*. In Klaus D. Sattler (Ed.) *Handbook of Nanophysics*, Taylor & Francis Publisher, CRC Press, ISBN: 978-1-4200-7538-0.

Recepción del Académico Miembro de Número, Profesor Francisco Hervé

.....

El agua es uno de los elementos básicos del sistema Tierra, característica distintiva de nuestro planeta, y base para el sustento de la vida. La manera en que el agua contenida en los glaciares está evolucionando en la actualidad, es el tema del Discurso de Incorporación a la Academia de Ciencias denominado LAS REVELACIONES DEL HIELO EN UN PLANETA EN DESGLACIACIÓN. que el Dr Casassa expondrá hoy día con motivo de su incorporación.

Gino Casassa estudió Ingeniería Hidráulica en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile donde se recibió en 1984. En 1989 obtuvo un Magíster en Geofísica/Glaciología en la Universidad de Hokkaido, en Japón, enfocándose en las avalanchas de nieve bajo la supervisión del profesor Norikazu Maeno. Me permito mencionar aquí que Gino Casassa es el tercer miembro de esta academia en haberse graduado en la Universidad de Hokkaido cuya colaboración con la Universidad de Chile comenzó a fines de los años sesenta bajo el influjo del geólogo Sr Tsuyoshi Nishimura aquí presente. Con posterioridad obtuvo su doctorado en Glaciología en la Universidad de Ohio State (USA) realizando estudios glaciológicos, y de imágenes satelitales de la plataforma de Ross, en la Antártica. De ambas incursiones en el extranjero volvió a Chile con contactos personales con científicos de

renombre, con los que ha colaborado posteriormente en proyectos de investigación en Patagonia y Antártica.

Sus relaciones institucionales formales en Chile han sido principalmente con la Universidad de Magallanes, una década con el CECS en Valdivia, y recientemente también con Geoestudios en la Región Metropolitana. Pero Gino ha sido esencialmente un científico vinculado al mundo, y pocos pueden exhibir la enorme tarea realizada inserto en instituciones, programas y comités internacionales. Gino es constantemente requerido para participar en comités del más alto nivel internacional en los temas de glaciología y cambio climático, lo que le significa un gran esfuerzo en viajar constantemente por el mundo.

Claro que el viajar forma parte del sello más profundo de Casassa como persona y como científico, pues ha participado y /o organizado mas de 10 expediciones científicas a la Antártica y mas de 15 a los hielos patagónicos en las ultimas décadas. Y cuando digo científicas, lo hago para excluir las innumerables expediciones de Gino montañista y de Gino profesional de la glaciología. Ello lo ha llevado a conocer y escalar montañas en los Andes, en los Antártandes, en los Himalaya y el Tibet, en Groenlandia y los Alpes, llegando a ser un reconocido experto en montañismo de alta dificultad, con realizaciones de reconocimiento mundial en ese rubro.

Siempre interesado en la innovación, realizó grandes y sostenidos esfuerzos para desarrollar los métodos de análisis de glaciares y nieves mediante teledetección, principalmente con equipos de radar que posteriormente aplicaron con éxito en Patagonia y Antártica para estudiar las interacciones de los glaciares con el clima. El doctor Gino Casassa fue pionero al plantear que los glaciares estaban en peligro, ya que su retroceso era inminente por efecto del calentamiento global.

A través de su participación como delegado del CNIA (Comité Nacional de Investigaciones Antárticas) a los comités internacionales de glaciología de SCAR (Scientific Committee for Antarctic Research) se fue acercando e incorporando a la comunidad glaciológica internacional, donde su experiencia en el tema y sus cualidades personales lo transformaron rápidamente en un elemento esencial en ellos. Ha desarrollado numerosos proyectos de investigación nacionales e internacionales en temas relacionados a los glaciares como indicadores de cambios en el clima y en el nivel de los océanos. Sus publicaciones

científicas son de gran relevancia, e incluyen las revistas Nature y Science.

Fue miembro del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) que fue co-galardonado con el Premio Nobel de la Paz 2007. Sus méritos en la ciencia le valieron obtener una beca de la Fundación Guggenheim en 2005, el premio al investigador más destacado otorgado por el Comité Chileno para el programa Hidrológico Internacional de UNESCO, y el del Premio de Investigación de la Fundación Humboldt.

En suma, la Academia de Ciencias verá muy incrementado su potencial de análisis y de difusión en la sociedad de los temas relacionados con los glaciares, su evolución y su relación con variables climatológicas, de gran interés científico y social en la actualidad.

LA CRIOSFERA: DESDE CRISTALES DE NIEVE A HIELOS ETERNOS

Gino Casassa Rogazinski

Geoestudios, San José de Maipo y
Universidad de Magallanes, Punta Arenas

Resumen

Se presentan las características principales de la nieve y el hielo y su relevancia en la sociedad. Se define la criósfera y se describe el estado actual de sus distintos componentes, incluyendo los hielos continentales, las plataformas polares flotantes de, glaciares, cubierta de nieve estacional, suelos helados, hielo marino, y hielo lacustre y fluvial. Finalmente se analizan las proyecciones futuras de la criósfera en un planeta afectado por el cambio climático antrópico.

Introducción

La nieve y el hielo pueden evocar una dicha suprema en algunos. Por ejemplo podemos pensar en canchas soñadas de nieve polvo, paisajes paradisíacos de glaciares, el momento cúlmine del arribo a una cumbre nevada en los Himalayas, un ambiente surrealista en un festival de nieve o hielo, un delicioso helado, o una fría cerveza durante una tórrida jornada. Otros asocian la nieve y el hielo con penurias –por ejemplo un frío bestial, tuberías de agua congeladas, horas de arduo trabajo para apalea nieve frente al portón de la casa, manos y pies congeladas, y catastróficas avalanchas. Pero más allá de estos pensamientos, ¿es válido preguntarnos si efectivamente debiéramos estar preocupados sobre las nieves y los hielos? Son realmente la nieve y el hielo tan importantes? La respuesta a ambas interrogantes es, categóricamente, ¡SÍ!

La nieve y el hielo son componentes críticos de nuestro planeta. En primer lugar, siendo

agua congelada, son parte esencial del ciclo hidrológico. También está claro que un factor controlador de primer orden de la abundancia de la nieve y el hielo es el clima. Menos clara es la influencia de la nieve y el hielo en el clima, normalmente a través de mecanismos de retroalimentación, que incluyen no solamente el conocido efecto albedo (definido más adelante), sino también complejas relaciones con el tectonismo por ejemplo.

La nieve y el hielo probablemente han existido sobre la Tierra desde por lo menos hace 2,7 billones de años, durante la glaciación Huroniana cuando un gran hielo continental cubrió durante unos 300 millones de años una gran parte de Norteamérica, cuya evidencia se basa en el descubrimiento de depósitos glaciales en el entorno del lago Hurón. Las hipótesis para explicar esta temprana glaciación incluyen una disminución de gases de efecto invernadero en la atmósfera (dióxido de carbono y metano), ligado por ejemplo al aumento de los niveles de oxígeno y/o a una disminución de la actividad volcánica, durante un periodo con débil energía solar. La controvertida hipótesis de la Tierra bola de nieve (“Snowball Earth”) propone que la Tierra estaba completamente cubierta por nieve y hielo durante el periodo Criogénico (635 a 850 millones de años). Mawson, el famoso explorador polar australiano, había sido el primero en encontrar evidencia del Criogénico en sedimentos glaciales en el sur de Australia, y los explicó, erróneamente a la postre, por un evento global frío, siendo que ocurrieron debido a la posición más polar

de Australia producto de la deriva continental. Más razonable parece ser la hipótesis de Tierra aguanieve ("Slushball Earth") en que al menos las regiones más ecuatoriales estaban libres de la nieve y el hielo. La glaciación más reciente culminó hace unos 18.000 años, cuando la temperatura promedio global era casi 10 °C más fría que la temperatura actual de la presente época del Holoceno.

La nieve y el hielo sobre el planeta, conocida como la criósfera, incluye los hielos continentales, las plataformas polares flotantes de hielo que son esencialmente una extensión del hielo continental interior, glaciares, cubierta de nieve estacional, suelos helados (incluyendo hielo permanentemente helado conocido como "permafrost" y suelos estacionalmente helados), hielo marino (agua de mar congelada), y hielo lacustre y fluvial (lagos y ríos congelados). El estado actual y la evolución de este mundo congelado tiene relevantes implicancias para la vida humana y el medio ambiente físico y biológico en este planeta.

Propiedades de la Nieve y el Hielo

Dependiendo de su temperatura y presión, el hielo, H_2O , exhibe 15 diferentes estructuras cristalinas, más 3 estados amorfos. Las estructuras cristalinas se conocen como Hielo I a Hielo XV, ocurriendo solamente en forma natural en la Tierra el Hielo I. Todas las demás formas cristalinas ocurren a temperaturas más bajas y a presiones más altas de las que existen en forma natural en nuestro planeta. Afortunadamente es una ficción el Hielo IX de la novela "Cat's Cradle" de Kurt Vonnegut, que 'cristalizaba todo el agua en la Tierra', simbolizando la auto destrucción involuntaria de la humanidad, asociada al 'bokononismo', puesto que el Hielo IX no es estable a las temperaturas y presiones terrestres. El hielo amorfo solo se ha logrado formar artificialmente y podría ocurrir en el espacio exterior a tasas de enfriamiento muy rápidas que podrían evitar la formación de una estructura cristalina. Todo el hielo que existe en forma natural en la Tierra es Hielo Ih, donde h denota la estructura hexagonal del cristal de hielo. Aunque no se hayan encontrado, no se puede descartar que otras estructuras de hielo puedan existir en zonas profundas del interior de la Tierra bajo grandes presiones. En la alta atmósfera puede

encontrarse Hielo Ic, vale decir hielo cúbico, formado en forma natural a partir de la condensación de vapor a temperaturas muy bajas.

Las características esenciales de la nieve y el hielo se deben a la naturaleza de la molécula de agua, H_2O . Por ejemplo, en el estado sólido, vale decir bajo 0 °C a la presión atmosférica, la molécula de agua se expande aproximadamente un 9%. Este comportamiento es bastante poco usual en la naturaleza y no se puede explicar de manera obvia a partir de la composición química del agua, que es una molécula químicamente muy simple. La razón de la expansión del agua en su estado sólido reside en las fuerzas químicas débiles asociadas a los enlaces de hidrógeno, que conectan los átomos de hidrógeno de una molécula con los átomos de oxígeno de una molécula vecina. A los 4 °C el agua alcanza su máxima densidad de 999,972 kg/m³, expandiéndose a temperaturas más bajas debido a cambios en estos enlaces de hidrógeno, al contrario de lo que se esperaría en fluidos y materiales normales que se expanden a temperaturas más altas. Por este motivo el hielo flota en el océano, de la misma manera que flota un cubo de hielo en un vaso. Si bien es cierto estas son malas noticias para el tráfico marítimo en zonas polares (recordemos el Titanic por ejemplo), y para las cañerías de agua en zonas frías que tienden a quebrarse durante inviernos fríos, son buenas noticias para los osos polares por ejemplo, que dependen del hielo marino para su subsistencia.

Otra propiedad interesante del hielo es su color. La molécula de agua H_2O absorbe 6 veces más las frecuencias rojas del espectro que aquellas azules, reflejando preferencialmente por lo tanto la luz azul. El hielo azul es particularmente obvio bajo la luz difusa, cuando el cielo está nublado. Si el hielo contiene un gran número de burbujas de aire, aparecerá blanco debido a múltiples reflejos de la luz incidente que se producen en la superficie rugosa de las burbujas. Esto también explica porqué la espuma de la cerveza es blanca, incluso en el caso de cervezas negras.

El hielo más grueso de la Tierra tiene una profundidad de casi 5 km, en el interior del hielo continental antártico, donde la presión es casi 500 veces mayor que la presión atmosférica a nivel del mar, pero esto sola-

mente representa menos de $\frac{1}{4}$ de la presión necesaria para transformar el Hielo Ih a otros hielos cristalinos. A la profundidad de 5 km, la temperatura de fusión del hielo es alrededor de $-3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este efecto de depresión de la temperatura de fusión con el aumento de presión es también una consecuencia directa de la naturaleza de los enlaces de hidrógeno que causan la expansión del agua al congelarse. La depresión del punto de fusión permite, por ejemplo, el clásico experimento de atravesar un bloque de hielo frío con un delgado alambre, provocando el derretimiento del hielo hacia abajo a mayor presión, y el recongelamiento hacia arriba una vez que se libera dicha presión y el alambre progresa hacia abajo.

La nieve es esencialmente una mezcla de hielo, aire, impurezas, y también agua si la temperatura del hielo está sobre el punto de fusión. Los cristales de nieve son verdaderas “cartas del cielo” como las llamó de manera tan acertada el físico japonés Ukichiro Nakaya, el primero en reproducir cristales de nieve en el laboratorio en la década de 1930, mediante pelos de conejo como núcleos de cristalización. Si la nieve es sometida a suficiente compactación y metamorfismo cristalino, tal como ocurre en un glaciar debido a la acumulación sucesiva de nieve, se transformará eventualmente en hielo. La nieve puede también transformarse en hielo si se derrite y se recongela, liberando burbujas de aire, tal como puede ocurrir durante el ciclo día/noche en las calles de las ciudades por ejemplo.

Nieve Estacional

En el Hemisferio Norte, la nieve estacional cubre 45 millones de km^2 a fines del invierno, equivaliendo en tamaño a 2.5 veces el área de Sudamérica. La nieve estacional del Hemisferio Sur, fuera de Antártica, se restringe a cordilleras y sectores meridionales de Sudamérica, Nueva Zelanda, y unas pocas islas del Océano Austral, con un área menor al 10% de la nieve del Hemisferio Norte. Si bien es cierto la cubierta de nieve estacional representa la componente criosférica de mayor área, debido a su escaso espesor su equivalente en agua medido en aporte al nivel global del mar es escasamente 1 cm.

La nieve estacional afecta directamente los recursos hídricos, particularmente durante

la primavera. En el Hemisferio Norte se ha detectado una disminución de la cubierta de nieve de más de 1% por década durante los últimos 40 años. A su vez los ríos de régimen nival en Norteamérica y Eurasia exhiben caudales punta que ocurren 1 a 2 semanas antes que hace 70 años. Si continúa esta tendencia de calentamiento, los recursos hídricos disminuirán notablemente en la primavera, afectando por ejemplo la agricultura y la generación hidroeléctrica.

El esquí también depende críticamente de la nieve estacional. En décadas recientes ha ocurrido una reducción de la nieve en centros de esquí en la costa este de los EE.UU., Australia y los Alpes europeos. En los Andes Centrales de Chile la línea de nieves ha ascendido más de 100 m en invierno y 200 m en verano durante los últimos 30 años. Proyecciones futuras indican que el calentamiento causará una reducción de la cubierta de nieve del 60% al 80% en zonas de latitudes medias hacia fines de siglo, mientras que se pronostican aumentos en Siberia y en el Ártico canadiense debido a mayor precipitación de nieve. La menor cubierta de nieve afectará severamente la industria del esquí, particularmente los centros de esquí ubicados a bajas altitudes.

Suelos Helados

Los suelos helados incluyen el suelo permanentemente helado (permafrost) y el suelo estacionalmente helado. En el Hemisferio Norte el área cubierta por suelos helados estacionales puede alcanzar un máximo $48 \times 10^6 \text{ km}^2$, con un mínimo de 6 km^2 . En contraste, la mayor parte de los suelos helados del Hemisferio Sur, aparte de Antártica, ocurre en Sudamérica, con un área estimada de permafrost de $100 \times 10^3 \text{ km}^2$.

Hay evidencia que la temperatura del permafrost ha aumentado en las últimas décadas, tanto en el Ártico como en algunas regiones de montaña. El calentamiento de los suelos helados está resultando en un aumento de los humedales en el Ártico, como asimismo un aumento en la formación de lagos termokársticos seguidos por rápido vaciamiento. El derretimiento del hielo también produce el debilitamiento del suelo, que a su vez puede producir efectos devastadores en la infraestructura (camino, líneas férreas, pistas aéreas, edificios, ductos), inestabilidad

de los suelos y caídas de rocas. De hecho durante el verano excepcionalmente caluroso de 2003, con temperaturas en Europa que fueron 6 °C más cálidas que lo normal, se produjeron en los Alpes numerosos eventos de caídas de rocas.

Un peligro potencial del calentamiento es la liberación de carbono orgánico. En efecto, los niveles superiores de permafrost contienen cerca de 850 Gt (Giga toneladas) de carbón, que equivale a un 10% más que el actual contenido de carbón presente en toda nuestra atmósfera. La liberación parcial de este carbono, sin mencionar el carbono almacenado en profundidad en el permafrost, puede aumentar notablemente el efecto invernadero.

Hielo Marino

El hielo marino ocurre en las zonas polares, tanto en el Ártico como en el Océano Austral alrededor de Antártica. La sal deprime el punto de congelamiento del agua de mar a una temperatura de -1.8 °C. Al comienzo una delgada placa de agua superficial se congela, progresivamente agregando hielo hacia abajo en forma de cristales columnares. Durante el proceso de cristalización, se produce un rechazo de la sal de mar, la cual queda atrapada en pequeños bolsones de salmuera altamente concentrada.

Después de un invierno, el hielo marino de 1er año puede alcanzar espesores de hasta 2 m. Si el hielo de 1er año no se derrite totalmente durante el verano, puede continuar creciendo por recongelamiento en su base y por precipitación nival en la superficie, transformándose en hielo multi-anual, que puede alcanzar espesores de hasta 4 m. El hielo multi-anual es transportado usualmente cientos de km por corrientes oceánicas y atmosféricas y puede sobrevivir más de una década. Durante el verano el hielo marino puede derretirse en la superficie, creando cuerpos de agua de derretimiento (lagunas y pozos), y también puede derretirse en su base. A medida que se genera agua de derretimiento, ésta escurre hacia abajo debido a su mayor densidad respecto del hielo, y a su vez produce derretimiento del hielo y puede mecánicamente romper la cubierta de hielo, efectivamente drenando la salmuera, y reduciendo la salinidad del hielo marino, que a su vez puede aumentar la resistencia mecánica del hielo multianual.

Debido a presiones causadas por el viento, el hielo marino puede fracturarse y crear espacios o verdaderos canales conocidos como "leads". Si un canal se recongela y es afectado luego por vientos, puede fácilmente romperse en bloques de hielo, creando formas lineales de gran espesor conocidas como cordones de hielo ("pressure ridges") que usualmente pueden llegar a tener espesores de 10 a 30 m.

El hielo marino en ambas regiones polares cubre 27×10^6 km² en invierno, y menos de 19 106 km² en verano. Dado que ya está flotando, el hielo marino no contribuye a elevar el nivel del mar luego de derretirse. El hielo marino del Ártico ha declinado notablemente las últimas tres décadas debido principalmente al calentamiento, con reducciones de un 9% por década según registros de septiembre y una reducción de 2.5% cada marzo. Se prevee que la declinación aumente debido al efecto de retroalimentación del albedo (reflectividad de la superficie), vale decir el oscurecimiento de la nieve y el hielo producto del derretimiento y de fuentes de contaminación por material particulado, que a su vez produce una mayor absorción de energía solar que contribuye al derretimiento. Los modelos predicen que el Océano Ártico estará totalmente libre de hielo marino en el verano mucho antes que el fin de siglo. También se proyecta que el hielo marino antártico disminuya bajo un progresivo calentamiento, pero a una tasa más moderada que el Ártico, debido al menos parcialmente a la presencia de la extensa cubierta de hielo antártico y a la corriente circumpolar que cumplen el rol de efectivo aislantes térmico.

A pesar que el hielo marino constituye un medio muy riguroso, es un hábitat único que alberga distintas especies como focas y osos polares. La reducción de hielo marino Ártico podría tener consecuencias muy negativas en los ecosistemas y también afectar las tradiciones y culturas ancestrales de los pueblos originarios. Los cambios asociados con los impactos del derretimiento del hielo marino son difíciles de cuantificar pero podrían incluir una potencial disminución del flujo, e incluso la terminación de la Corriente del Golfo de México, que advecta aguas cálidas al Atlántico Norte. Sin embargo, no todos los impactos del calentamiento global son negativos. Una cobertura reducida de hielo mari-

no está resultando en mayor tráfico marítimo y crecimiento económico asociado, a pesar que aumentarán en forma correspondiente los riesgos ambientales. Incluso el mundo político será afectado por un calentamiento continuo ya que los países del Ártico están ya preparando reclamos de soberanía en el área.

Hielo Lacustre y Fluvial

El hielo lacustre y fluvial se forma por el congelamiento del agua de derretimiento desde la superficie, similar al hielo marino, con un crecimiento vertical de cristales columnares que pueden alcanzar espesores de 1 m o más. Tal como en el hielo marino, también se pueden desarrollar cordones de hielo, aumentando sustancialmente el espesor. Hacia el fin del invierno se derrite prácticamente todo el hielo lacustre y fluvial, excepto por localidades remotas en zonas polares y en las altas montañas.

El efecto del calentamiento también está claramente documentado en el hielo lacustre y fluvial del Ártico, con un acortamiento del periodo de congelamiento debido al adelantamiento de la desintegración en la primavera, y, en menor grado, por un congelamiento cada vez más tardío en otoño. Se esperan reducciones futuras de hielo lacustre y fluvial en escenarios de calentamiento futuro. Esto produciría cambios en las crecidas por represamientos potenciales de bloques de hielo aguas arriba, resultando en mayores eventos por inundaciones en regiones que se calientan preferentemente.

El acceso a comunidades e infraestructura industrial a través de cuerpos congelados de lagos y ríos se verá afectado si se reduce el periodo de congelamiento. También se afectarán las actividades tradicionales de los pueblos originarios, tal como caza y pesca, como asimismo el patinaje en hielo recreacional a la intemperie.

El Futuro de la Criosfera

Si continúan las tendencias climáticas de los últimos 2 millones de años, la Tierra debería experimentar un nuevo periodo glacial en 10.000 años o a lo sumo en pocas decenas de miles de años. Sin embargo, algunos científicos creen que debido a la emisión antrópica de gases de efecto invernadero esta ciclicidad natural podría verse disturbada y el

presente Holoceno podría transformarse en un "superinterglacial" que podría durar un periodo de tiempo inusualmente largo.

Las concentraciones de los gases de efecto invernadero son ahora las mayores de al menos los últimos 800.000 años. Esto es crítico pues estos gases, que hemos estado emitiendo desde la Revolución Industrial, controlan de manera relevante la temperatura atmosférica. ¿Qué podemos realizar para evitar el derretimiento de las nieves y los hielos?

La solución de fondo es reducir la generación de gases de efecto invernadero empleando tecnologías limpias y preservando los bosques. También es interesante poder estudiar, con el cuidado adecuado por cierto, técnicas geoingenieriles como por ejemplo el secuestro y almacenamiento de carbono en pozos profundos. Es prioritario alcanzar acuerdos vinculantes entre todas las naciones, mucho más amplios y estrictos que el Protocolo de Kioto, de modo de reducir la concentración de gases de efecto invernadero a valores razonables. Cada uno de nosotros tiene un importante rol en ese sentido, en nuestras actividades diarias, no solamente las grandes empresas y los gobiernos.

El tomar acción ahora contribuirá a dejar a nuestros descendientes un planeta más limpio y con mejores tecnologías energéticas. Para entender mejor el cambio climático antrópico, existe una necesidad urgente por realizar estudios más detallados en muchos temas criosféricos críticos, sobretodo aquellos ligados a ciclos de retroalimentación asociados al calentamiento global, como por ejemplo el efecto albedo y la potencial liberación de carbono a partir del derretimiento del permafrost. Lo anterior sin olvidarnos de disfrutar, mientras podamos, de la nieve y el hielo generosamente provistas por la Providencia.

Referencias

Lemke, P., J. Ren, R.B. Alley, I. Allison, J. Carrasco, G. Flato, Y. Fujii, G. Kaser, P. Mote, R.H. Thomas and T. Zhang. 2007. Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solo-

- mon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter4.pdf>
- Orlove, B., E. Wiegandt and B.H. Luckman. 2008. Darkening Peaks: Glacier Retreat, Science, and Society, University of California Press, 296 p.
- Rosenzweig, C., G. Casassa, D.J. Karoly, A. Imeson, C. Liu, A. Menzel, S. Rawlins, T.L. Root, B. Seguin and P. Tryjanowski. 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 79-131. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-chapter1.pdf>
- Sharp, R.P. 1992. Living Ice: Understanding Glaciers and Glaciation. Cambridge University Press, Cambridge, 225 p.
- UNEP. 2007. Global outlook for ice & snow. UNEP/GRID-Arendal. Byrkeland Trykkeri A/S, Birkeland, Norway, 235 p. http://www.unep.org/geo/geo_ice/
- UNEP/ WGMS. 2008. Global Glacier Changes: facts and figures. United Nations Environment Programme, World Glacier Monitoring Service, DEWA/GRID-Europe, 88 p. <http://www.grid.unep.ch/glaciers/>

Presentado por el Académico
Miembro de Número,
Profesor Servet Martínez

Incorporación como Miembro Correspondiente
en Chile de la Academia Chilena de Ciencias del
Instituto de Chile • 23 de Julio de 2014

“LOS VIENTOS EN EL DESIERTO MÁS ÁRIDO DEL MUNDO”

.....

Profesor José A. Rutllant Costa

Ingeniero Civil. Profesor Titular del Departamento de Geofísica de la
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile
Investigador en el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA)

Comenzaré esta presentación agradeciendo a la Academia Chilena de Ciencias la oportunidad y también el desafío, de poder representar en ella a las Ciencias Atmosféricas.

He elegido “Los vientos en el desierto más árido del mundo” porque este tema nos ha convocado recurrentemente por hace ya más de 45 años. Todo comienza a raíz de una carta del Profesor Heinz Lettau (1969), quien fuera luego mi tutor durante los estudios de doctorado que comencé en 1973 en la Universidad de Wisconsin (Madison, USA).

Agradecimientos

Además del Profesor **Heinz H. Lettau**, debo un muy especial agradecimiento al **Grupo de Meteorología del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, co-partícipe de esta distinción**, que contribuí a fundar junto al Profesor Humberto Fuenzalida Ponce hace ya más de 50 años. La cohesión, ambiente colaborativo y amistad en todos estos años se ha plasmado en un destacado reconocimiento como Grupo tanto a nivel nacional como internacional.

No puedo dejar de mencionar también el **apoyo incondicional de mi familia** en este largo camino, que ha significado sacrificios, carencias, paciencia, ausencias: **Claudio, Daniel, María Elena y Zaida**.

Finalmente quiero agradecer al Prof. Ricardo Muñoz quien aceptó gentilmente revisar esta presentación. Sus sugerencias contribuyeron a mejorarla significativamente.

Plan de la presentación

Esta presentación tiene dos partes.

La primera trata de responder en términos simples, para el público no especialista, a la pregunta:

¿Cómo se originan los vientos?

La segunda pretende ilustrar y documentar brevemente una respuesta a la siguiente paradoja:

¿Cómo se puede explicar la extrema aridez del desierto de Atacama, adyacente a la mayor fuente de humedad del planeta?

Primera Parte

Más allá de la definición poética del viento que hizo Neruda, quiero dedicar unos minutos a explicar cómo se genera el viento y su relación con el campo de temperatura.

La presión atmosférica es el peso de la columna de aire sobre una unidad de área horizontal. Ella quedó en evidencia con el experimento de Torricelli que se ilustra en la **Figura 1a**, en la que el peso de la columna de

mercurio sobre la sección transversal del tubo sobre la superficie libre del mercurio en la cubeta equilibra exactamente la presión atmosférica sobre ella. Como resultado de la acción de la gravedad, la presión atmosférica decrece rápidamente con la altura (**Figura 1b**), alcanzando la mitad de su valor a nivel del mar a unos 5500 m de altitud (la mitad de la masa atmosférica está por debajo de este nivel, la otra mitad por arriba).



Figura 1. Definición de presión atmosférica a partir del experimento de Torricelli (a) y su variación con la altitud (b).

En el plano vertical representado en la **Figura 2** conectemos con una línea todos los puntos que tienen una presión de 1000 hPa (línea isobárica aproximadamente recta para pequeñas distancias) y repetamos el procedimiento para aquellos puntos que tienen una presión de 900 hPa (más arriba) (**Figura 2**). Como por definición de presión atmosférica la masa de cualquier columna vertical de área unitaria comprendida entre las isóbaras de 1000 y 900 hPa debe ser la misma (equivalente a 100 hPa), las columnas de sección unitaria

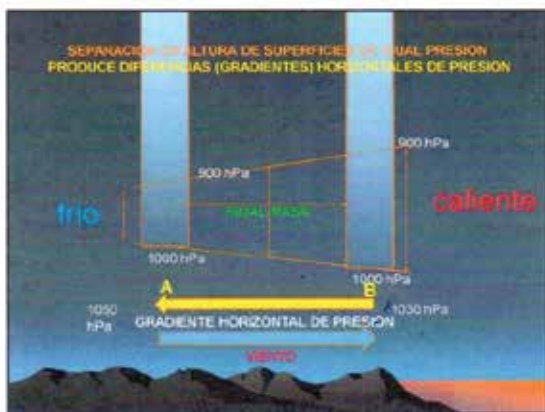


Figura 2. Producción de gradientes horizontales de presión por calentamiento diferencial.

más largas a la derecha de la Figura 2 deben tener aire de menor densidad, (es decir, más cálido), y viceversa al lado izquierdo de esta Figura. Hablamos aquí de un calentamiento diferencial entre el sector derecho e izquierdo de la Figura que origina la separación de las isóbaras.

El viento horizontal (“viento”) responde en primera instancia a gradientes horizontales de presión (positivo de menos a más). Por ejemplo, si tomamos el punto **B** con una presión de 1030 hPa, el punto **A** a la izquierda en la misma horizontal deberá tener una presión superior (por ejemplo 1050 hPa). El **gradiente horizontal de presión** irá de derecha a izquierda y el **viento** asociado de izquierda a derecha (de mayor presión (**A**) a menor presión (**B**)). Lo contrario ocurrirá si repetimos el procedimiento por encima de la superficie isobárica de 900 hPa.

Este proceso, que muestra una respuesta directa del viento al gradiente horizontal de presión (*circulación directa*), se puede aplicar en primera aproximación a las **brisas de mar y tierra** ilustradas en la **Figura 3**. Un análogo con las **brisas de ladera** aparece en la **Figura 4**.

Veamos ahora cómo se comporta el viento a **escalas mayores** en que se manifiesta el efecto de la rotación terrestre (**efecto de Coriolis**).

A **escala planetaria**, los trópicos se calientan más que los polos, con un ciclo estacional que sigue al sol. En forma similar, durante el verano/invierno los continentes se calientan/enfrían más que los mares adyacentes, generándose las circulaciones monzónicas (**Figura 5**).

Para mantener el equilibrio térmico del planeta, la atmósfera y los océanos deben

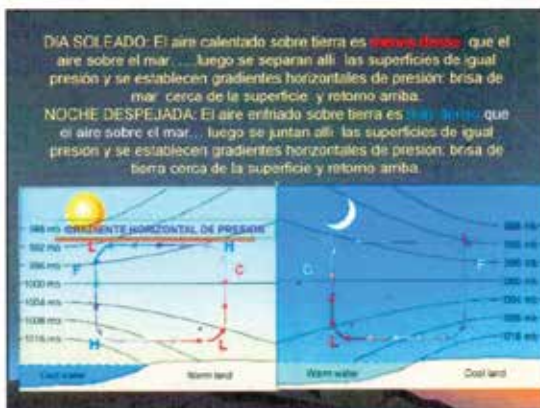


Figura 3. Brisas de mar y tierra producto del calentamiento diferencial mar-tierra.



Figura 4. Brisas de ladera producto del calentamiento diferencial valle-ladera.

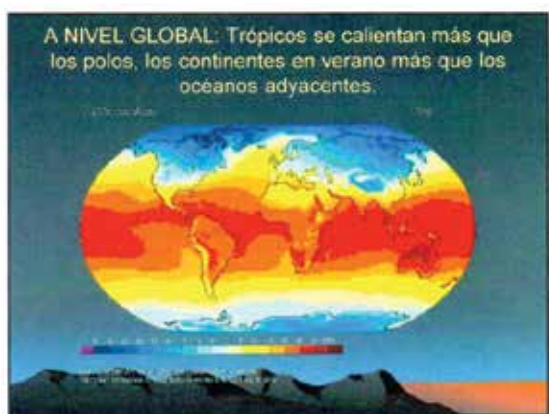


Figura 5. Calentamiento diferencial trópicos-polos (máximo en hemisferio de invierno) y continentes-océano (máximo en verano: monzones)

transportar el exceso de calor tropical, generado por una absorción de radiación solar que supera a la pérdida radiativa en el tope de la atmósfera y por la liberación de calor latente en los grandes conglomerados nubosos de la zona de convergencia de los alisios, hacia los polos donde se pierde más energía radiante que la que se absorbe, particularmente en invierno. Esto opera de la misma manera en que se transporta calor desde una pared cálida (estufa) en una sala hacia la pared fría (ventana con vidrio simple) (Figura 6). El transporte de calor en la atmósfera desde la zona ecuatorial hacia los subtropicos se desarrolla a través de una circulación parecida a la directa, llamada “celda de Hadley” (Figura 7). Cerca de la superficie del mar los vientos “alisios” se dirigen desde la alta presión subtropical (A) hacia el ecuador, desviándose a la izquierda/derecha en el hemisferio sur/norte, convergiendo hacia la



Figura 6. Circulación del aire en una sala con una pared caliente (estufa) y otra fría (ventana). Analogía con la celda de Hadley (calentamiento de la pared equivale aquí a la liberación de calor latente en nubes de convección profunda). Nótese en superficie la baja presión (B) en la zona de ascenso y la alta presión (A) en la de descenso.

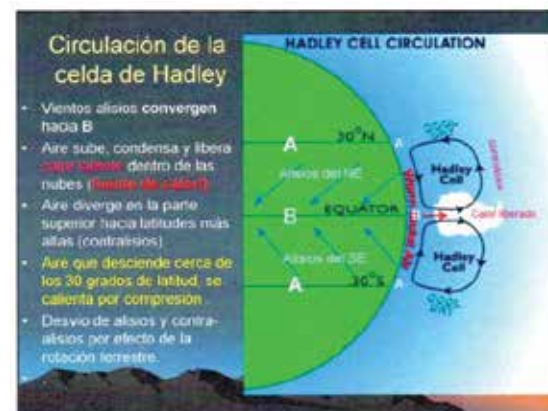


Figura 7. Circulación en la celda de Hadley. Los vientos alisios, que se dirigen hacia la zona de convergencia intertropical, se desvían por efecto de la rotación terrestre (efecto de Coriolis). El aire que sube/baja se enfría/calienta por expansión/compresión adiabática.

vaguada ecuatorial (B) o zona de convergencia intertropical (Figura 7). Esta zona de baja presión se debe a que la divergencia de flujo en la parte alta de las nubes sobre-compensa la convergencia superficial, con una pérdida neta de la masa de la columna que provoca el descenso de la presión: (B).

Alrededor de los 30 grados de latitud la convergencia del flujo de aire en la parte superior de esta rama de la celda de Hadley, hace que el aire descienda (subsistencia) calentándose por compresión adiabática, generando una capa de “inversión térmica de

subsistencia” cuya base está a ~ 1000 m snm. La base de esta inversión limita el desarrollo vertical de las nubes costeras en el norte de Chile (estratocúmulos) (Figura 8). Bajo la base de la inversión tendremos una capa húmeda coronada por los estratocúmulos que limita con el mar; sobre ella una **capa muy seca y transparente** (Figura 9).



Figura 8. Rama descendente (subsistencia) en la celda de Hadley: formación de la inversión térmica de subsidencia que limita el desarrollo vertical de la nubosidad costera. La convergencia en la parte superior de esta rama sobre-compensa la divergencia en capas bajas, produciendo una alta presión en superficie (A): anticiclón subtropical.



Figura 9. Fotografía en Paposo Alto que ilustra los cielos claros del aire subsidente (observatorios astronómicos) y el límite de desarrollo vertical de la nubosidad costera al alcanzar la base de la inversión térmica.

Análogamente a lo que ocurre en la rama ascendente de la celda de Hadley, la **convergencia** en la parte superior de la rama descendente sobre-compensa la divergencia de flujo cerca de la superficie, produciendo una acumulación neta de masa en la columna que

deriva en la existencia de una **alta presión (A)** cuasi permanente en superficie: el **anticiclón subtropical**, que domina el clima de las zonas centro y norte de Chile y sur del Perú.

Inicialmente el flujo de aire que sale radialmente desde el centro de este anticiclón en la **Figura 10** se desvía gradualmente por efecto de Coriolis hasta alcanzar un equilibrio de régimen permanente (**equilibrio geostrófico**) en que el viento gira en torno al centro de alta presión en el sentido anti-horario. El roce del aire con la superficie del mar desvía ligeramente estos vientos hacia la derecha del flujo geostrófico, constituyendo los vientos dominantes del SW/S/SE frente a la costa árida y los alisios del SE sobre mar abierto (**Figura 10**).

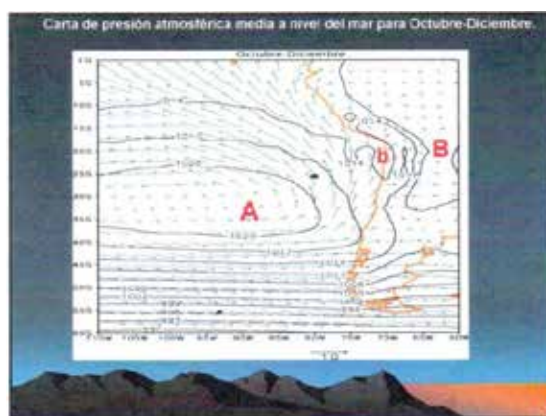


Figura 10. Mapa con isobaras medias para el período de octubre a diciembre que muestra el anticiclón del Pacífico sureste (A), la baja presión continental (B) por calentamiento diferencial con el océano, y la vaguada costera de origen térmico (b). Las flechas indican los vientos en superficie con una dirección media del SW frente a la costa.

Segunda parte: Otra manera de formular la pregunta inicial sería: ¿Por qué no se desarrolla la brisa de mar a lo largo de la costa árida y semi-árida de Chile y Perú?

A fines de los 60, durante el proceso de encontrar un camino propio para el incipiente grupo de Meteorología en la FCFM (respondiendo al dilema de ser **cabeza de ratón** en lugar de cola de león), el Prof. Lettau sugirió una campaña de medición de vientos sobre la pendiente andina en la parte más árida del desierto de Atacama, luego que él mismo, con el equipo de la Universidad de Wisconsin, acababa de obtener sorprendentes resultados al estudiar el desplazamiento de dunas

(barjanes) en Pampa de la Joya, Perú (17 S, 1260 msnm) (Lettau H.H., 1967). Ese trabajo evidenció que los vientos que mueven esos barjanes (Figura 11) no correspondían a una brisa diurna tradicional (ladera arriba) sino que soplaban esencialmente en dirección del S-SE paralelos a las líneas de nivel (*vientos de marea térmica*) ya que incluían entre sus forzantes el efecto de la rotación terrestre (aceleración de Coriolis). En Arequipa (2400 m snm), en cambio, los flujos anabáticos (ladera arriba) y catabáticos (ladera abajo) se daban de una manera clásica (circulación directa). Por otra parte, Lettau atribuyó la inhibición de la brisa diurna (mar muy frío – tierra caliente) a un aumento de la subsidencia diurna que “aclara los cielos y tiende a despejar la nubosidad costera después del mediodía”.



Figura 11. Barjanes (dunas en forma de media luna) en el desierto de Pampa de la Joya (17°S). La fotografía está tomada hacia el SW.

En este contexto se organizó nuestra primera campaña de mediciones fuera de Santiago (The Antofagasta Field Experiment: AFE), que se llevó a cabo en la sede Antofagasta de la U. de Chile (20 m snm), y en las estaciones de ferrocarril (FCAB) de Baquedano (1027 m snm) y Río Loa (Calama: 2244 m snm) en el invierno de 1970 (Rutllant et al., 1972; Rutllant y Ulriksen, 1979). Los resultados de esas mediciones de viento superficial, que incluyeron además perfiles verticales de viento con globos piloto y radiosondas cautivas y libres, permitieron visualizar el **aumento de la subsidencia sobre la costa (Figura 12)** a través de la intensificación y descenso de la base de la inversión térmica después de mediodía. Esos resultados permitieron también documentar el incremento diurno de la componente del viento ladera arriba en los

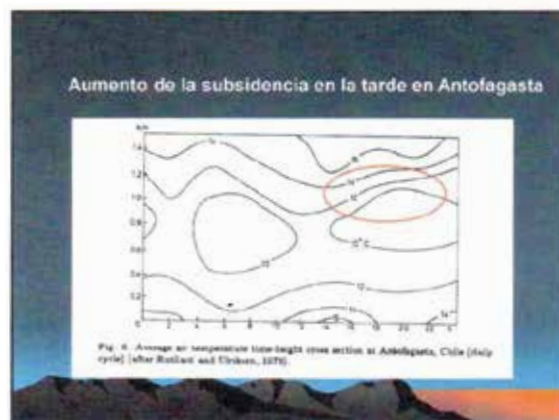


Figura 12. Aumento de la subsidencia en horas de la tarde en Antofagasta (inversión térmica descendiendo y se intensifica).

primeros 700 m sobre la superficie entre Baquedano (donde domina la componente del viento paralela a la pendiente: SW en el día y NE en la noche (Figura 13) y Río Loa (vientos desde el W en el día y del E en la noche).

La conexión de este sistema de circulación sobre la ladera andina con el aumento de la subsidencia en la tarde sobre la costa constituyó el tema central de la tesis doctoral “On the extreme aridity of coastal and Atacama deserts in northern Chile” (Rutllant 1977). En ella se pudo determinar un **incremento diurno de la subsidencia en $3-4 \text{ cm s}^{-1}$** , a través del cálculo de la divergencia integrada dentro de la capa límite del flujo ladera arriba mediante un modelo simple a partir de los datos del AFE (Figura 14).

En 1978 aparece la publicación del Instituto de Investigaciones Ambientales de la Uni-

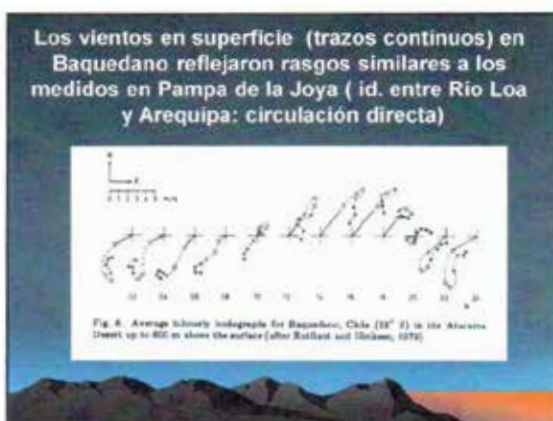


Figura 13. Hodógrafas del vector velocidad con los vientos en superficie (trazos sólidos) y los vectores cada 100 m de altura hasta los 600 m.

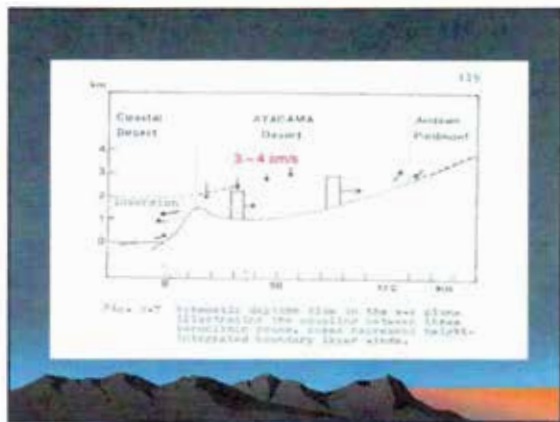


Figura 14. Circulación esquemática en un plano vertical perpendicular a las líneas de nivel del relieve. Las cajas representan valores del viento en este plano integrados en la altura a partir de los perfiles de viento medidos en las Baquedano y Río Loa. La divergencia de este flujo integrado ladera arriba en el día produce una subsidencia media de 3 a 4 cm/s (Rutllant, 1977).

versidad de Wisconsin titulado **“Exploring the World’s Driest Climate”**, editado por H.H. Lettau y K. Lettau, en referencia al desierto de Atacama y, particularmente a la franja costera árida del norte de Chile y el Perú. **En ella se atribuye el incremento diurno de la subsidencia al transporte turbulento de masa inmediatamente por debajo de la inversión térmica.**

20 años más tarde se celebraron los 50 años del Departamento de Ciencias Atmosféricas y Oceánicas de la Universidad de Wisconsin, ocasión en que tuve el honor de participar y dedicar al Prof. Lettau mi presentación con resultados de las recientes mediciones con equipo moderno, realizadas en el marco del proyecto **DICLIMA**: Dinámica del Clima de la Región de Antofagasta, (Programa SECTORIAL de CONICYT : Biomas y Climas Terrestres y Marinos del Norte de Chile”). La parte terrestre de esta campaña se desarrolló en Michilla, al norte de Mejillones, y Baquedano durante los meses de enero de 1997, julio de 1997 y enero de 1998.

Los resultados de estas mediciones pusieron de manifiesto **fuertes ciclos diarios** de temperatura y viento en una capa comprendida entre la inversión térmica y altitudes correspondientes a la cima de los Andes (**Figuras 15 y 16**). La divergencia total del flujo zonal (W-E) en la tarde resultó del orden de cinco veces superior a la reportada en la literatura para la costa subtropical oeste de Nor-

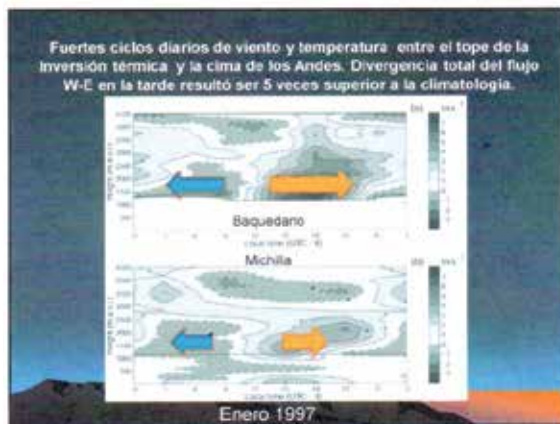


Figura 15. Ciclos diarios de los vientos integrados cerca de la superficie (rama directa) durante el período diurno (flechas naranjas) y en el de madrugada (flechas azules) para Baquedano (arriba) y Michilla (abajo) durante enero de 1997.



Figura 16. Id. a la Fig. 15, pero para julio de 1997.

te-América. También se pudo establecer que los flujos ladera arriba/abajo son más intensos en verano/invierno (Rutllant et al., 1998; Rutllant et al., 2003).

Las simulaciones numéricas de los ciclos diarios sobre la ladera andina con modelos regionales permitieron extender geográficamente estos resultados y diagnosticar los forzantes del régimen de circulación aprovechando la auto-consistencia física de estos modelos (MM5 y WRF).

Muñoz (2008) concluye, al estudiar los ciclos diarios de los vientos satelitales sobre el mar, que éstos no corresponden a una brisa de mar normal forzada por el contraste térmico mar-tierra, sugiriendo a través de la simulación numérica con un modelo MM5, la influencia del ciclo diario de la velocidad vertical en la capa comprendida entre 2000 y 4000 m de altitud. **La fase diurna de este ciclo**

diario se caracterizó por subsidencia reforzada a lo largo de toda la costa del centro-norte de Chile.

Recientemente, y con motivo de nuestra participación en el Programa Internacional VOCALS- REx (VAMOS Ocean-Cloud-Atmosphere-Land Study- Regional Experiment) en octubre-noviembre 2008, se realizaron radiosondeos en Iquique y Paposo. Los ciclos diarios resultantes en temperatura y viento en la tropósfera baja afectada por la ladera andina fueron comparados con los de Michilla de enero de 1997, resultando una consistencia razonable. Mediante un modelo de simulación WRF se compararon favorablemente también los ciclos diarios de los vientos zonales observados en Iquique y Paposo (**Figura 17**), consistentes con el ciclo diario de calentamiento/enfriamiento sobre la ladera andina.

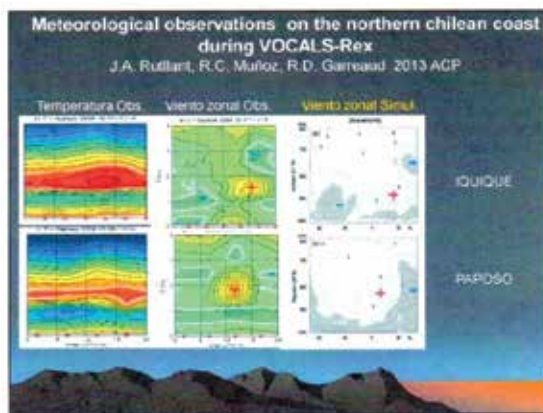


Figura 17. Ciclo diarios de la temperatura sobre la inversión térmica de subsidencia (izquierda) y de la componente del viento en la dirección W-E (centro) observados en Iquique (arriba) y Paposo (abajo). A la derecha los resultados de la simulación con un modelo numérico WRF para los mismos vientos y lugares.

Como resultado de esta misma simulación se encontró que, tomando un nivel representativo de la máxima subsidencia después del mediodía (800 hPa; aproximadamente 2500 m) y promediando en latitud (19 a 22 grados S) y tiempo (4 días de simulación) (**Figura 18**), la máxima subsidencia ocurre entre las 13:00 y las 18:00 HL en una estrecha franja costera de aproximadamente 10 km, con **valores que exceden ligeramente los 3 cm/s**. (Rutllant et al., 2013).

Curiosamente, este valor coincide con las primeras estimaciones que resultaron de la



Figura 18. Velocidad vertical a 800 hPa (aproximadamente 2500 m) en función de la hora local y longitud geográfica promediada latitudinalmente (19-22 °S) y temporalmente (4 días de simulación). El cuadrado representa el área de máxima subsidencia entre 13 y 18 horas en una franja costera de aproximadamente 10 km de ancho.

aplicación de un modelo lineal integrado en altura y tiempo-dependiente, forzado por un viento térmico que decrece exponencialmente con la altura (Rutllant 1977).

Epílogo

La **evolución de esta línea de investigación durante casi 50 años** ilustra cómo a partir de la intuición del Prof. Lettau al observar el cielo y las nubes costeras después del mediodía desde Pampa de la Joya (1964) condujo a una primera campaña de mediciones en Antofagasta (1970) y al desarrollo de un modelo conceptual validado por un modelo analítico simple (1977). Una segunda campaña de mediciones con equipo más moderno (1997-98) permitió no solo cuantificar mejor el aporte de la circulación diurna/nocturna, invierno/verano cerca de la superficie de la ladera andina sino también la contribución de la circulación de retorno a la divergencia/convergencia regional diurna/nocturna. Un trabajo sobre la caracterización y el forzamiento de los vientos satelitales sobre el mar frente a la costa árida, simulados mediante un modelo numérico regional (2009) y la coyuntura de un experimento internacional sobre las interacciones entre la nubosidad costera el mar, la atmósfera y la tierra (VOCALS REx, 2008), cierran este ciclo con nuevas observaciones entre Iquique y Paposo y simulaciones numéricas que básicamente confirman y expanden resultados anteriores (Rutllant et al., 2013).

Hasta ahora hemos tratado la circulación atmosférica regional sobre la ladera andina en un plano vertical perpendicular a la cadena montañosa, suponiendo homogeneidad en la dirección paralela a ella. Esto, que aparece como un simple ejercicio académico tratando de explicar las causas de la extrema aridez del desierto, tiene una contrapartida más aplicada, al referirnos a la componente del viento paralela al relieve (y a la costa).

Así, los **vientos del sur** que observamos en Baquedano y que mueven las dunas en Perú se manifiestan además en los vientos del S en la costa (surgencia y pesquería/acuicultura, energía eólica).

Además de los ciclos diarios en esta componente del viento, sus oscilaciones cuasi-semanales producen eventos de refuerzo-relajación en conexión con la ocurrencia de **bajas costeras**, modulando el funcionamiento de los ecosistemas costeros (fertilización de bahías, estabilidad de la columna de agua), la alternancia de cielos despejados (turismo) y nieblas costeras o camanchacas (recurso hídrico, impacto en el transporte aéreo, terrestre y marítimo); todos ellos de amplio impacto en la actividad nacional.

Por otra parte los **vientos del norte** sobre la capa límite marina tienen la huella de los vientos de barrera andinos, que se generan por el bloqueo que ejerce la cordillera a los vientos que inciden sobre la ladera de barlovento y que no logran pasar por encima (bajos números de Froude). Estos vientos adquieren periódicamente velocidades que superan los 12 m/s constituyendo una importante fuente de energía eólica entre los 2000 y 4000 m de altitud.

Finalmente cabe mencionar un par de **proyectos en desarrollo** que de alguna manera derivan de estas investigaciones:

Estudios de eventos de vientos fuertes en la pampa de Mejillones y en la zona de Pisco-Ica (Paracas) en relación a registros sedimentarios en el océano orientados a inferir el comportamiento del clima en el pasado.

Referencias

- Lettau H. H., 1967. "Small to large scale features of boundary layer structure over mountain slopes". *Proceedings Symposium on Mountain Meteorology*, Section 2. Fort Collins, Colorado, USA.
- Muñoz R. C. 2008. "Daily cycle of surface winds over the subtropical southeast Pacific". *Journal of Geophysical Research*. **113**, D13107, doi: 10.1029/2006GL026921.
- Rutllant J., Ulriksen P., Sippa J., Salinas H., y L. Doerr. 1972. "Resultados de la campaña de mediciones meteorológicas realizada en la provincia de Antofagasta". *Publicación 140. Departamento de Geofísica*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Rutllant J. 1977. "On the extreme aridity of coastal and Atacama deserts in northern Chile". *Ph.D. Thesis*, Department of Meteorology. University of Wisconsin, Madison, USA.
- Lettau H.H. and K. Lettau (eds.). 1978. "Exploring the World's Driest Climate". Report 101. *Center for Climate Research*, Institute for Environmental Studies, University of Wisconsin, Madison, USA.
- Rutllant J. and P. Ulriksen. 1979. "Boundary-layer dynamics of the extremely arid northern part of Chile: The Antofagasta Field Experiment". *Boundary Layer Meteorology* **17**, 41-55.
- Rutllant J., H. Fuenzalida, R. Torres y D. Figueroa. 1998. "Interacción océano-atmósfera-tierra en la región de Antofagasta (Chile 23°S): Experimento DICLIMA". *Revista Chilena de Historia Natural* **71**, 405-427.
- Rutllant J., Fuenzalida H., Aceituno P. 2003. "Climate dynamics along the arid northern coast of Chile: The 1997-1998 DICLIMA Experiment". *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* **108**, 4358 doi:10.1029/2002JD003357
- Rutllant J.A., Muñoz R.C. and Garreaud R.D. 2013. "Meteorological observations on the northern Chilean coast during VOCALS-REx." *Atmospheric Chemistry and Physics* **13**, 3409-3422.

Recepción del Académico Miembro de Número, Profesor Juan Carlos Castilla

.....

Presidente de la Academia, Autoridades, Osvaldo, amigos: Buenas noches y gracias por asistir a esta ceremonia tan especial en la Academia de Ciencias de Chile.

Ceremonia especial no solo por el motivo que nos congrega, sino que por la maravillosa interpretación de Chopin!!!...que aplaudimos celebramos y agradecemos a Javier Lanis. No es frecuente en la Academia recibir en su seno a un nuevo miembro con tal belleza y virtuosidad musical. Una vara muy alta a batir!

Pero, lo que nos congrega esta noche, una vez mas, es dar la más cordial bienvenida a un nuevo miembro de la Academia, al Dr. Osvaldo Ulloa Quijada. Lo hago, en representación de la Academia, con el mayor agrado y satisfacción pues con el Dr. Osvaldo nos une una amistad que yo caracterizaría no necesariamente como muy cercana o íntima, sino que mas bien una amistad académica verdadera forjada casi a la distancia... entre Santiago y Concepción...o a partir de los numerosos lugares entre los cuales nos movemos y en que nuestros nombres aparecen... como Congresos y otros.... Una amistad basada en un respeto mutuo que deriva en confianza y en mi caso admiración por lo logrado por Osvaldo en tan corto tiempo...al menos comparado con "mi tiempo".

En verdad, cuando Osvaldo nace .. ahí por el 61 ...un 21 de Mayo!...yo ingresaba a la Universidad, luego de un terremoto y en la época que precede a la Gran Reforma Universitaria, que culminó con la generación del 67 y con los movimientos estudiantiles en Paris y en todo el mundo. Creo fue la primera generación de Universitarios chilenos que salimos masivamente a la calle... como ahora...en busca de mayor participación y quizás mas democracia universitaria e igualdad de oportunidades.... Entonces, Osvaldo jugaba a las bolitas!

Osvaldo es Santiaguino e Institutano y obtiene su titulo de Biólogo Marino en la U. de Concepción en 1983 ... 1982-1983 son años cruciales en mi carrera académica, pues ocurrió la fundación de la Estación Costera de Investigaciones Marinas de Las Cruces...Osvaldo esta entonces terminando su carrera de pregrado en la Universidad de Concepción.

Osvaldo decide hacer su Magister, en B. Marina en Dalhousie, Halifax, Canadá, el que obtiene en 1987. Más tarde, en 1993, logra su doctorado en Oceanografía, en la misma universidad bajo la tutoría de Dr. Trevor Platt y también realiza su primer post-docorado en el reconocido Bedford Institute of Oceanography en Halifax. Luego tiene una segunda estadía de post-doc en el Niels Bohr

Institute, Dinamarca, con el Dr. Gary Shaffer, un oceanógrafo muy reconocido y muy amigo de Chile.

Son unos 10 años de formación académica del más alto nivel, donde Osvaldo siempre destacó como un investigador de gran potencialidad y creatividad.

Mis primeros contactos académicos con Osvaldo, creo, son a través del Fondap de Oceanografía & Biología Marina que dirigí desde Conicyt. En este programa el desarrollo de la Oceanografía estuvo centrada en Concepción. No se aun si a esta iniciativa se le ha dado la dimensión que merece como pionera en el país. En ese momento había en Chile solo 2 programas Fondap dirigidos neutralmente desde Conicyt por Dr Eric Goles y quien habla; uno en Modelamiento Matemático y el otro en Oceanografía & B. Marina. En estos programas aglutinamos a los mejores científicos de ambas ciencias que existían en Chile - entre ellos Osvaldo en Oceanografía con su juventud y post doc- y les insuflamos suficiente confianza, guía y dinero (-quiero creerlo así-) como para que se produjese un despegue inicial sustantivo.

Para mi fueron casi 4 años de administración de media jornada en CONICYT... (-en que pude haber escrito muchos trabajos-). Con Eric les entregamos a estos investigadores la visión y fuerza que necesita un avión-académico para despegar...el que esperábamos, ya en el aire...requeriría menos esfuerzos para avanzar. Creo que nuestras expectativas se materializaron. A lo menos en el caso del mar hoy se puede afirmar que en Concepción esta la mejor Oceanografía en Latinoamérica...y yo agregaría (-con modestia -), que también está en Chile la mejor Ecología Costera Experimental de Latinoamérica. No toda debido a esos Fondaps pioneros...pero hay allí una cuota visionaria... de otra forma que lo digan los doctorantes y post-docs que abundante y que generosamente apoyamos!

Creo que esos despegues los piloteamos, con Eric, con dedicación...también con errores y dificultades, como toda acción humana...y mas aun académica... pero con convicciones personales y sin estar directamente involucrados en las investigaciones. Solo nos interesaba que el "despegue" fuese seguro!.

Ese despegue tuvo un costo de unos 6-7 millones de dólares de la época!

Por esos tiempos, Osvaldo y compañía me convencieron de adquirir una "Gran Boya Oceanográfica Experimental"... (una boya de punta... equipada con muchos sensores.....con transmisión de datos en tiempo real...etc, etc, etc), que se armaría en Dinamarca...y costaría unos 90 a 100.000 dólares. Una decisión no fácil para mi como Director del Fondap! (estoy hablando de hace unos 15 años atrás!).. La boya (enorme) se armó, se importó por aduana con muchas dificultades... Aduana quería saber exactamente que había adentro de la Boya!!!... se ancló en Dichato...y desgraciadamente no duró mucho, pues una tormenta la cuasi-destruyó. Pero creo aprendimos de la experiencia. Algún día sabré si de allí se recogieron datos oceanográficos de importancia o si surgieron incentivos a la investigación oceanográfica. Así es la oceanografía, tiene sus dificultades operativas, el mar es impredecible en su fuerza y agresividad; por eso es (era) casi imposible lograr seguros para esos equipos.

Osvaldo ... la sufrí con eso! ... pero confíe en el equipo de Concepción. Sin arrepentimientos por supuesto.

En el año 2004 la Academia de Ciencia de Chile abre una oportunidad para reconocer jóvenes investigadores sobresalientes en Chile, con su Programa "Ciencia de Frontera" y ciertamente Osvaldo es identificado de inmediato y pasa a formar parte del primer contingente. Hoy, nos felicitamos por ello, porque ahora junto a Osvaldo, hemos elegido como miembros de nuestra Academia ya a varios de esos investigadores de Frontera; para que nos ayuden en las tareas de la Academia y al mismo tiempo para disminuir la edad promedio de nuestros miembros...y con ello aumentar la varianza!

También la Academia reconoció en uno de los alumnos de Osvaldo, el Dr. Ricardo De Pol, a una de las mejores tesis de doctorado del país.

Osvaldo ha guiado más de una docena de tesis de pregrado, ha dirigido 6 tesis de doctorado y entrenado al menos a 7 alumnos de post-grado. Estos ya más de 25-30 estudiantes hacen que se proyecte con fuerza en Chile el inicio de una escuela de pensa-

miento liderada por Osvaldo. Hay sello allí. Sello de seriedad, buena ciencia, compromisos y sobretodo sello de nuevas y creativas líneas de investigación. Líneas que hoy son de punta en el mundo y que Uds tendrán la oportunidad de conocer a continuación, en la charla de Osvaldo; charla que tiene un título atractivo y enigmático. Ella esta relacionada, sin dudas, a su visión creativa de conectar a la oceanografía con la diversidad y ecología de los microorganismos oceánicos.

La productividad científica de Osvaldo ya se eleva por sobre los 60 trabajos científicos. 4 de ellos en Nature y 3 en Science.....sin contar aquellos en revistas de Oceanografía del más alto nivel mundial. A ello se agregan 7 capítulos de libros y otras publicaciones en congreso y seminarios nacionales e internacionales. Una productividad sobresaliente, que nos enorgullece!

Otros aspectos resaltantes de Osvaldo son su capacidad de trabajo en equipo, su habilidad en la guía de generaciones jóvenes de científicos, su gran capacidad como profesor en la enseñanza de la oceanografía y su liderazgo y visión en investigación. Esto ultimo plasmado recientemente en su nombramiento como Director del Instituto Milenio de Oceanografía. Finalmente tenemos en Chile un Milenio del “ Mar Azul y Profundo”. Osvaldo: Buena suerte en este esfuerzo. Chile lo necesita y ahora que tenemos el Cabo de Hornos quizás podamos conocer esos mares nuestros tan desconocidos.

Varios de los presentes hoy en la sala estamos acompañando a Osvaldo en este desafío mayor

Para finalizar. Osvaldo no es “todo ciencia”. Por supuesto es también marido y padre dedicado cariñoso. Además, es un muy buen guitarrista y tiene su corazón bien puesto en el folklore chileno y latinoamericano..... dicen que también juega fútbol con sus alumnos...pero no se si es tan buen futbolista como guitarrista!! Lo dudo.

Estando en Halifax Osvaldo formó parte de un conjunto musical llamado “ARAUCO” ...del que también eran miembros varios estudiantes chilenos que estudiaban allí..... Rubén Escribano, aquí presente, y Renato Quiñones (en charango!); creo que también un estudiante peruano y un irlandés?

Mi Decano Juan Correa, que también estudiaba en Halifax en esos tiempos, habla en alto grado del conjunto. Debo creerle...es mi Decano!

Así que en resumen. Hoy, le damos la mejor bienvenida al Dr. Osvaldo Ulloa a la Academia de Ciencias de Chile. Tenemos, por primera vez, entre nuestros miembros a un Oceanógrafo y me felicito por ello.

En la Academia necesitamos de la sabia nueva, empuje y sabiduría, como la de Osvaldo y sus otros colegas Miembros Correspondientes, para ayudarnos a que la ciencia en Chile sea cada día más reconocida, financiada y rinda sus frutos a la sociedad

Osvaldo, amigo, un placer recibirte en esta casa!

CUANDO LOS OCÉANOS SE SOFOCAN, LOS MICROBIOS ESTÁN DE FIESTA

.....

Profesor Osvaldo Ulloa

Departamento de Oceanografía & Instituto Milenio de Oceanografía.
Universidad de Concepción

Resumen

El oxígeno es un elemento clave para la biología y el reciclaje de la mayoría de los elementos geoquímicos y ha moldeado la evolución química y biológica de la Tierra. Con la disminución de los niveles de oxígeno en el océano, el flujo de energía y el reciclaje de elementos se desvían progresivamente desde los organismos multicelulares hacia el mundo microbiano; esto conduce a cambios químicos significativos en la columna de agua, tales como la pérdida de nitrógeno fijado y la producción abundante de gases de efecto invernadero y otros tóxicos. Estudios recientes en la zona de mínimo de oxígeno del Pacífico Sudoriental frente a Chile han demostrado que esta zona carece totalmente de oxígeno y que alberga comunidades microbianas metabólicamente muy diversas y activas. Además, estudios moleculares -incluyendo genómica microbiana ambiental- y geoquímicos en esta región han revelado por primera vez un activo, aunque críptico, ciclo del azufre acoplado al ciclo del nitrógeno. Las zonas marinas anóxicas como la del Pacífico Sudoriental corresponden a un fase intermedia entre dos estados finales representado por sistemas totalmente óxicos y sistemas totalmente sulfídicos. El impacto de las comunidades microbianas a la fisiología planetaria es probable que aumente en el futuro con el cambio climático en curso, debido a la disminución de los niveles de oxígeno y la expansión de las zonas marinas anóxicas.

La mayoría invisible y parientes más antiguos

Hasta fines de la década de los '70 en el siglo anterior, se consideraba que la abundancia de los microorganismos -como las bacterias- en el agua de mar era unas cien veces más baja de lo que hoy sabemos que existe, y por lo mismo los microorganismos se consideraban poco importantes en oceanografía. El paradigma cambió cuando se desarrolló una técnica en que se pudo teñir el ADN microbiano y contar directamente el número de células que existía en un volumen dado de agua de mar. Hoy sabemos que si tomásemos agua de mar en una playa cualquiera encontraríamos más de un millón de bacterias por mL. Sin embargo, no fue hasta la década de los '90 con el desarrollo de las técnicas moleculares independientes de cultivo que se comenzó a conocer la gran diversidad de los microorganismos existentes en el mar y en otros ambientes. A pesar de esta revolución científica, se estima que más del 99% de las distintas especies que existen de microorganismos no ha podido ser cultivadas aún para su estudio en el laboratorio.

Si consideramos la evolución química y biológica del planeta en su historia de vida -unos 4.500 millones de años- los primeros habitantes de nuestro planeta fueron microorganismos, los cuales permanecieron en forma exclusiva por gran parte de su historia. Además, los registros geológicos muestran

que durante la primera mitad de la historia planetaria no existió oxígeno libre en forma significativa en la atmósfera terrestre. Sólo tras la invención de la fotosíntesis oxigénica por parte de las cianobacterias, el planeta comenzó a oxigenarse unos 2,300 millones de años atrás; la vida multicelular se desarrolló en épocas más recientes y en presencia de oxígeno.

El océano actual y las zonas de mínimo de oxígeno

El océano actual se encuentra en su mayoría bien oxigenado, incluso a las profundidades abisales, debido principalmente a la circulación termohalina de gran escala. Sin embargo, existen zonas del océano donde el oxígeno escasea, las cuales se denominan zonas de mínimo de oxígeno. Las principales zonas de mínimo de oxígeno, en donde además se acumula nitrito (lo que no ocurre en el resto del océano), se encuentran en el Océano Pacífico oriental y en el Océano Índico norte. La falta total de oxígeno disuelto en estas zonas sólo se pudo establecer recientemente con el desarrollo de nuevas tecnologías de medición, en particular del microsensor STOX (Revsbech *et al.*, 2009). Así, estas zonas reciben también el nombre de zonas marinas anóxicas, AMZ (Ulloa *et al.*, 2012).

En las ZMA, al no existir oxígeno, el nitrato es usado por los microorganismos como aceptor de electrones (oxidante) y, por lo tanto, la materia orgánica se respira con nitrato por medio de un proceso llamado desnitrificación. Éste produce nitrógeno molecular (N_2) que escapa hacia la atmósfera; el nitrógeno fijado (e.g., el nitrato), que es uno de los nutrientes principales para la productividad primaria del océano, se pierde por lo tanto como N_2 . También las AMZ generan en sus bordes gran cantidad de óxido nitroso (N_2O), que es otro gas de efecto invernadero y que participa también de la destrucción del ozono atmosférico.

Por otro lado, existen fiordos y cuencas anóxicas permanentes (como el Mar Negro) o estacionales en las cuales desaparece el nitrato y se acumula amonio y sulfuro de hidrógeno (H_2S); este último es un gas altamente tóxico para los organismos multicelulados. Hasta hace poco, se pensaba que estos sistemas sulfídicos tenían una microbiología y

biogeoquímica distinta a la que existe en las ZMA no-sulfídicas, pero estudios recientes, como los que se discuten en este trabajo, han demostrado que esto no es totalmente así.

El microcosmos de las zonas de mínimo de oxígeno

El primer estudio molecular independiente de cultivo realizado en la ZMA frente a Iquique para estudiar la diversidad bacteriana (Stevens & Ulloa, 2008) reveló la presencia de abundantes γ -proteobacterias, cuyos parientes más cercanos eran bacterias simbiotes de bivalvos gigantes que habitan los ecosistemas de fuentes hidrotermales profundos. Estas bacterias simbiotes obtienen la energía de la oxidación aeróbica del H_2S proveniente de las fumarolas hidrotermales. Sin embargo, las ZMA no muestran acumulación de H_2S y el paradigma a la fecha era que debía agotarse totalmente el nitrato antes que se produjera la sulfato reducción (un proceso estrictamente anaeróbico) que es capaz de generar H_2S , como ocurre en las cuencas sulfídicas. Por lo tanto, en base a los resultados moleculares se postuló la posibilidad de que existiera un ciclo activo del azufre en las ZMA, algo no considerado a la fecha para estos ambientes.

Paralelamente, similares descubrimientos se hacían en otros ambientes deficientes de oxígeno y se lograba establecer mediante técnicas de genómica ambiental (o metagenómica) que las γ -proteobacterias azufre-oxidantes de vida libre -y que a la fecha no han sido cultivadas y se les denomina SUP05- tienen el potencial metabólico de oxidar el azufre con nitrato y fijar carbono inorgánico, entre otros (Walsh *et al.*, 2019).

La aplicación de técnicas moleculares permitió también la identificación y caracterización molecular de otros grupos microbianos importantes para la biogeoquímica de aguas deficientes de oxígeno, incluyendo a las bacterias anammox (que realizan la oxidación anaeróbica del amonio), picocyanobacterias, arqueas amonio-oxidantes, etc. (Wright *et al.*, 2012; Ulloa *et al.*, 2013).

Un ciclo del azufre críptico

Combinando técnicas de genómica ambiental y geoquímica, se logró demostrar finalmente que en la ZMA frente a Iquique

la materia orgánica es oxidada en parte con sulfato por bacterias sulfato-reductoras, las cuales producen H_2S . Sin embargo, el H_2S es inmediatamente oxidado por las bacterias SUP05, utilizando al nitrato como aceptor de electrones (Canfield *et al.*, 2010). De esta manera, no existe acumulación de H_2S , es decir, no existe una manifestación geoquímica que los procesos asociados al azufre estén ocurriendo, haciendo que el ciclo del azufre en una ZMA no haya sido evidenciado hasta esa fecha.

Debido a que las ZMA modernas soportan los mismos microorganismos y ciclos biogeoquímicos que los cuerpos de agua sulfídicos existentes hoy en día, y presumiblemente también que los ambientes sulfídicos del pasado, ellas se pueden ver como una fase intermedia entre dos estados finales representado por sistemas totalmente óxicos y sistemas totalmente sulfídicos.

Regreso al futuro

Debido al calentamiento global, se considera que las zonas de mínimo de oxígeno se están expandiendo, tanto como resultado de la reducción de la solubilidad de oxígeno a temperaturas más altas, como a un aumento de la estratificación de la columna de agua resultante de gradientes más fuerte de temperatura en las aguas superiores (Keeling *et al.*, 2010). La expansión de las áreas deficientes de oxígeno seguramente alterará los ecosistemas marinos, incluyendo la distribución y ecología de la fauna marina. La expansión de las AMZ también debería aumentar las tasas de pérdida de nitrógeno fijado como N_2 , así como las tasas de producción de N_2O . Eventualmente algunas de las AMZ podrían llegar a ser fulfídicas. En este escenario de cambio global, el impacto de las comunidades microbianas a la fisiología planetaria es probable que aumente en el futuro.

Referencias

- Canfield DE et al. (2010) A cryptic sulfur cycle in oxygen-minimum-zone waters off the Chilean coast. *Science* 330:1375–1378.
- Keeling RF, Körtzinger A, Gruber N (2010) Ocean deoxygenation in a warming world. *Ann. Rev. Mar. Sci.* 2:199–229.
- Revsbech NP et al. (2009) Determination of ultra-low oxygen concentrations in oxygen minimum zones by the STOX sensor. *Limnol. Oceanogr. Methods* 7:371–381.
- Stevens H, Ulloa O (2008) Bacterial diversity in the oxygen minimum zone of the eastern tropical South Pacific. *Environ. Microbiol.* 10:1244–1259.
- Ulloa O, Canfield DE, Delong EF, Letelier RM, Stewart FJ (2012) Microbial oceanography of anoxic oxygen minimum zones. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 109:15996–16003.
- Ulloa O, Wright JJ, Belmar L, Hallam SJ (2013) Pelagic Oxygen Minimum Zone Microbial Communities. In *The Prokaryotes - Prokaryotic Communities and Ecophysiology*, eds Rosenberg E, DeLong EF, Stackebrandt E, Lory S, Thompson F (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg), pp 113–122.. 4th Ed.
- Walsh D a et al. (2009) Metagenome of a versatile chemolithoautotroph from expanding oceanic dead zones. *Science* 326:578–582.
- Wright JJ, Konwar KM, Hallam SJ (2012) Microbial ecology of expanding oxygen minimum zones. *Nat. Rev. Microbiol.* 10:381–394.

Nuevas orientaciones de las Ciencias Químicas. Materiales Nanoestructurados. Rol de las interfaces

Dra. Ligia Gargallo

Doctora en Ciencias Químicas de la Universidad de Chile

Miembro de Número de la Academia Chilena de Ciencias

Un enfoque interdisciplinario de investigación en Ciencias Químicas de primera línea en la actualidad es el desarrollo tanto del marco conceptual como del fondo experimental de la ciencia de los materiales nanoestructurados y las perspectivas de sus aplicaciones tecnológicas. Se considera que algunas direcciones actuales en la preparación, caracterización y manipulación de los nanomateriales, conjuntamente con el modelado de las relaciones función estructura-dinámica única de nanoestructuras y sus conjuntos es de vital importancia. Las implicaciones de tamaño cuántico y los efectos de la forma en la energética, la estructura, la respuesta eléctrica-óptica y la dinámica, revelan nuevos fenómenos físicos únicos que cualitativamente difieren a los de la materia como un todo y proporcionan vías para el control de la función de las nanoestructuras. Ciencias Químicas constituye una contribución importante a esta temática y al área científico-tecnológico. Las aportaciones de la Química de Superficies a la Nanociencia juega un rol muy significativo. No cabe duda que hay futuro para lo pequeño, como medidas de propiedades sobre moléculas individuales, manipulación y ordenamiento de moléculas sobre superficies sólidas.

Este artículo tendrá dos partes diferenciadas. En una primera parte se presentará una breve historia de algunas temáticas y comentarios de investigadores en la discipli-

na, de alguna forma integrados debido a la celebración del año internacional de la Química 2011. En una segunda parte, se darán algunos ejemplos del rol que cumplen las interfaces en la formación de materiales nanoestructurados.

Breves comentarios de eventos importantes en Ciencias Químicas

En el 2011 se está celebrando el “**Año Internacional de la Química**”, una iniciativa de la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) y la UNESCO, para celebrar los logros de la Química y su contribución al bienestar de la Humanidad. Fue decretado por la Asamblea General de Naciones Unidas el 30 de diciembre de 2008. Bajo el lema “**Química: nuestra vida, nuestro futuro**”, sus objetivos son incrementar la apreciación pública de la química como herramienta fundamental para satisfacer la necesidad de la sociedad, promover el interés por la química entre los jóvenes, y generar entusiasmo por el futuro creativo de la química. Se ha elegido este año porque coincide además con el centenario de la otorgación del Premio Nobel de Química a Marie Curie, una oportunidad para **reconocer la contribución de la mujer a la Ciencia**. También se conmemora el centenario de la fundación de la International Association of Chemical Societies, precursora de la IUPAC, proporcionando una oportunidad para destacar los

beneficios de la colaboración científica internacional. El director general de la UNESCO, Koïchiro Matsuura, hizo propia la decisión de la Asamblea General y acotó que “es indudable que la química desempeñará un papel muy importante en el desarrollo de fuentes alternativas de energía y la alimentación de la creciente población mundial”. Por este motivo se están celebrando actividades en todo el mundo durante 2011 para resaltar la importancia de la química en el sostenimiento de los recursos naturales.



Como ya se ha señalado, el año 2011 coincide con el centenario del Premio Nobel de Química otorgado a Madame Marie Curie (1911): una oportunidad para celebrar las contribuciones de las mujeres a la ciencia.

En esta ocasión he creído pertinente traer una temática bastante conocida desde tiempos remotos y que cada día toma mayor actualidad, me refiero a la **Química de Superficies** y su estrecha relación con la **Nanociencia**. Se hará una breve historia de los eventos más significativos y su repercusión en la actualidad y en el futuro. Se comentarán las contribuciones de tres Químicos, premios Nobel en diferentes etapas.

Reconocimiento y Premios a los científicos de Química de Superficies

El premio Nobel de Química 2007 fue dado a Gerhard Ertl (nacido en Alemania en 1936), del Instituto Fritz Haber, Berlín, perteneciente a la Max Planck Gesellschaft, por sus estudios de **procesos químicos en superficies sólidas**. La Química de Superficies estudia el comportamiento de átomos y moléculas en las superficies de los materiales. Las reacciones químicas superficiales tienen un importante cometido en la industria química y en sistemas naturales. Es una rama de

la química que ayuda a responder preguntas muy diversas, como por ejemplo por qué se oxida el acero, cómo se producen los fertilizantes, cómo funciona el catalizador de los automóviles y por qué se deteriora la capa de ozono. Asimismo, el conocimiento de las reacciones químicas que tienen lugar en superficies ayuda a producir energía renovable de modo eficiente y a crear nanomateriales altamente organizados para la industria electrónica.

Durante muchos años los científicos han estudiado diversos fenómenos que ocurren en las superficies de los materiales. Uno es la adsorción, que ocurre cuando una molécula choca con una superficie sólida y queda retenida en ella. Luego puede moverse de un lugar de la superficie a otro, fenómeno llamado difusión, o puede abandonar la superficie, lo que se denomina desorción. La interacción entre la superficie y la molécula adsorbida puede ocasionar la *disociación* de la molécula, es decir, la ruptura de sus enlaces químicos, con la consiguiente generación de fragmentos atómicos o moleculares que, a su vez, pueden difundir hasta entrar en colisión con otras especies superficiales, con las que pueden reaccionar, formar nuevos enlaces y generar nuevas moléculas. Por ejemplo, la reacción entre hidrógeno (H_2) y nitrógeno (N_2) para generar amoníaco (NH_3) sobre una superficie de hierro (Fe) implica primero la adsorción de H_2 y N_2 , luego su disociación para generar átomos de H y N, que se difunden y entran en colisión entre ellos, con lo que se hidrogenan los átomos de N para formar NH_3 . Este se desorbe inmediatamente de la superficie. Para poder estudiar estos fenómenos, los investigadores crearon instrumentos que les permitieran observar directamente los procesos químicos superficiales. El estudio de tales procesos tiene una larga historia. En 1912, el francés Paul Sabatier (1854-1941) recibió el premio Nobel de química por un método de hidrogenación de moléculas orgánicas en presencia de un metal. No se sabía entonces que el paso crucial de esta reacción sucede en la superficie del metal, que primero adsorbe moléculas de hidrógeno, las que luego se disocian para generar átomos de hidrógeno. En 1932 el mismo premio fue otorgado al estadounidense Irving Langmuir (1881-1957) por contribuciones tan fundamentales a la Química

de Superficies que muchos lo consideran el fundador de la disciplina. Este Químico estadounidense conocido por su trabajo en distintos campos de la química estudió en las universidades de Columbia y Gotinga. Desde 1932 hasta su jubilación en 1950, fue director adjunto del laboratorio de investigación de la General Electric Company. Trabajó en el desarrollo de las lámparas de tungsteno, en el aparato de descarga de electrones, en las bombas de vacío y en la soldadura de hidrógeno atómico. Langmuir y su colega estadounidense Gilbert Newton Lewis desarrollaron una teoría de la interacción química y la valencia basada en la estructura del átomo, conocida como teoría de Langmuir - Lewis. La investigación de Langmuir en la física de las nubes le condujo a la estimulación artificial de la lluvia. Por su trabajo en películas monomoleculares y en Química de Superficies, fue galardonado con el Premio Nobel de Química.



Irving Langmuir

Muchas disciplinas científicas y tecnologías modernas tienen una deuda con los trabajos de Langmuir. Por ejemplo, Langmuir fue pionero en el estudio del plasma -el término que introdujo para describir una mezcla compleja, inestable de gases ionizados que exhibe inusuales propiedades eléctricas y magnéticas. Langmuir inventó una sonda especial para medir electrón-temperatura, un concepto totalmente nuevo en el momento. También modernizó la teoría de enlace químico mediante la introducción de

los conceptos de electrovalency y covalencia. Pero la investigación que le valió el Premio Langmuir Nobel de Química en 1932 estaba en el campo de la Química de Superficie (es decir, el estudio de las fuerzas químicas en los límites entre dos sustancias diferentes). Langmuir había hecho el descubrimiento revolucionario que los gases que absorben, o se aferran, sobre la superficie de un líquido o un sólido son de una capa muy delgada -sólo un átomo o una molécula de espesor. Su obra más extraordinaria se hizo con las películas de aceite sobre el agua. Para ayudar en esta investigación inventó un dispositivo para medir la longitud y el área de las moléculas individuales que todavía está en uso hoy día. Su estudio relacionado con la acción catalítica de las películas de gas en los alambres de platino explica muchos fenómenos misteriosos de la Química de Superficie y de los fenómenos catalíticos. de tierras silvestres y la energía atómica. Él falleció de un ataque al corazón en Falmouth, Massachusetts, a la edad de 76 años.

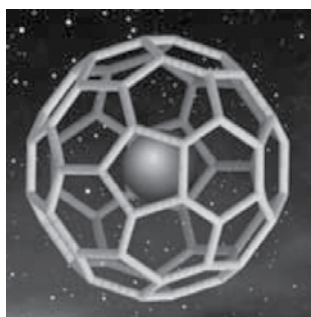
Las monocapas de Langmuir corresponden a películas de espesor monomolecular sobre una superficie acuosa. Es decir, interfase aire-agua. Se registra la isoterma presión superficial-área por molécula (π -A) de donde se pueden obtener información sobre tamaños moleculares, interacciones, información termodinámica (áreas de exceso, energías de Gibbs de exceso). Asimismo, con el tiempo se pudo evaluar la estabilidad de esta monocapa y su homogeneidad (microscopía de ángulo Brewster, espectroscopia de reflexión) y se observó como cambiaban estas propiedades al modificar la temperatura, el pH, la fuerza iónica en la subfase agua.

Los avances de esta temática en aquella época se vieron demorados por la falta de instrumentos que permitieran estudiar directamente fenómenos moleculares sobre superficies, hasta que, a comienzos de la década de 1960, Gerhard Ertl, el actual galardonado, comenzó a desarrollar métodos basados en la tecnología del ultravacío.

Corría el mes de septiembre de 1985, cuando en la Universidad Rice, en Houston, Texas, el químico Harry Kroto, junto a los investigadores norteamericanos Richard Smalley y Robert Curl y dos estudiantes de postgrado, reconocieron por vez primera una nueva forma de carbono puro en (nues-

tro planeta). Con tal descubrimiento se derumbaba un paradigma de la ciencia. Hasta ese momento se creía que el carbono solo existía en dos formas naturales estables: el diamante, uno de los materiales más duros que se conoce, y el grafito, uno de los más quebradizos. La nueva forma del carbono estaba compuesta por una colección de 60 átomos, organizados de forma similar a la de un balón de fútbol. Debido a esa simetría, usual en las estructuras geodésicas del arquitecto norteamericano Richard Buckminster Fuller (1895-1983), inicialmente los científicos pusieron a la molécula el nombre de buckminsterfullereno, aunque tal complicado término suele acortarse a fullereno o buckyball. El hallazgo salió publicado inmediatamente, el 14 de noviembre de 1985, en la sección de cartas del semanario científico *Nature* y 11 años después, en 1996, trajo a Kroto, Smalley y Curl la gloria del Premio Nobel de Química.

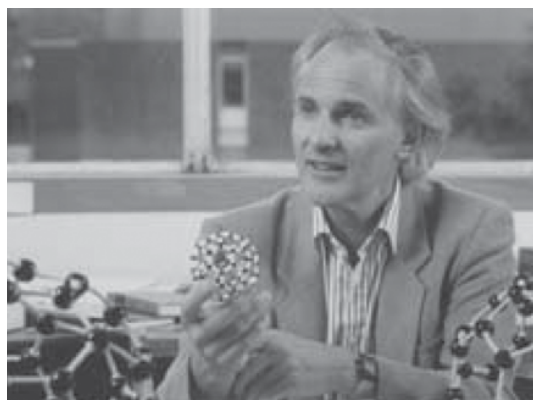
Sin embargo, en una autobiografía, Harry Kroto confesaría: “Yo nunca soñé con ganar el Nobel. De hecho yo estaba muy contento con mi trabajo científico antes del descubrimiento del C_{60} . Una cosa que yo no aconsejaría es hacer ciencia con el objetivo de ganar un premio. Sería como una receta para una eventual desilusión”.



De hecho, reconocer el C_{60} fue resultado de buscar una explicación a las observaciones de Kroto sobre el “polvo” estelar, que consideraba constituido por carbono. El carbono es elemento fundamental de la vida en nuestro planeta. Se sabe que la mayoría del que existe en el universo se formó en los núcleos de las estrellas después del Big Bang y se supone que viajó por el espacio hasta caer sobre los planetas en formación. Mediante el estudio de la composición de estrellas, cuyas atmósferas contienen cadenas alternadas de carbono y nitrógeno, Kroto intentaba aclararse cómo y en qué condiciones había llegado el carbono hasta la Tierra, cómo se mante-

nían unidos estos conglomerados para poder viajar por la vastedad del espacio interestelar sin destruirse.

La pregunta detrás de la que iba siguió sin responderse, pero él se hizo famoso y abrió una puerta al desarrollo de la nanotecnología, pues es en ese campo donde estarían las probables aplicaciones de los fullerenos.



De acuerdo a Harry Kroto “La nanotecnología es la química del siglo XXI”

El impacto es que abre nuevas perspectivas al conocimiento de las estructuras nanométricas, especialmente en el área de los nuevos materiales. Los fullerenos nos hablan sobre la composición de materiales en los cuales antes no podíamos pensar. En cuanto a su aplicación práctica ya se han usado en los plásticos, en la farmacéutica y se aplicará también en la electrónica y para tener materiales más resistentes. -La nanotecnología ya no pertenece al futuro, sino que es parte de nuestro presente. La nanotecnología es la química del siglo XXI y por eso es muy importante que todos los países la tengan en consideración. Es una tecnología de avanzada. Vincula la biología con la física y la ingeniería, apoyados todos por la Química. Es poderosa y por eso será un beneficio para la humanidad, si se emplea de forma inteligente, y un peligro también si se usa para cuestiones militares, por ejemplo. Por eso hay que ser muy cuidadoso en los objetivos. El reto más importante para un país que quiera usar la nanotecnología es la educación de los jóvenes en las ciencias. Si no se tiene un grupo de jóvenes científicos que deseen trabajar de una manera dura y fuerte, lo cual es necesario para obtener resultados en la química y la biología molecular, entonces no serás capaz de hacer descubrimientos y no se podrá

emplear el conocimiento. La tendencia que existe a nivel mundial de priorizar el financiamiento de la ciencia aplicada en perjuicio de las investigaciones básicas que ocurre porque muchas de estas decisiones las toman personas que no son científicos, que suelen darles menos importancia a las ciencias fundamentales. Debe haber un balance científico. Y que las ciencias básicas se consideren como ocurría en los siglos XVII o XVIII.

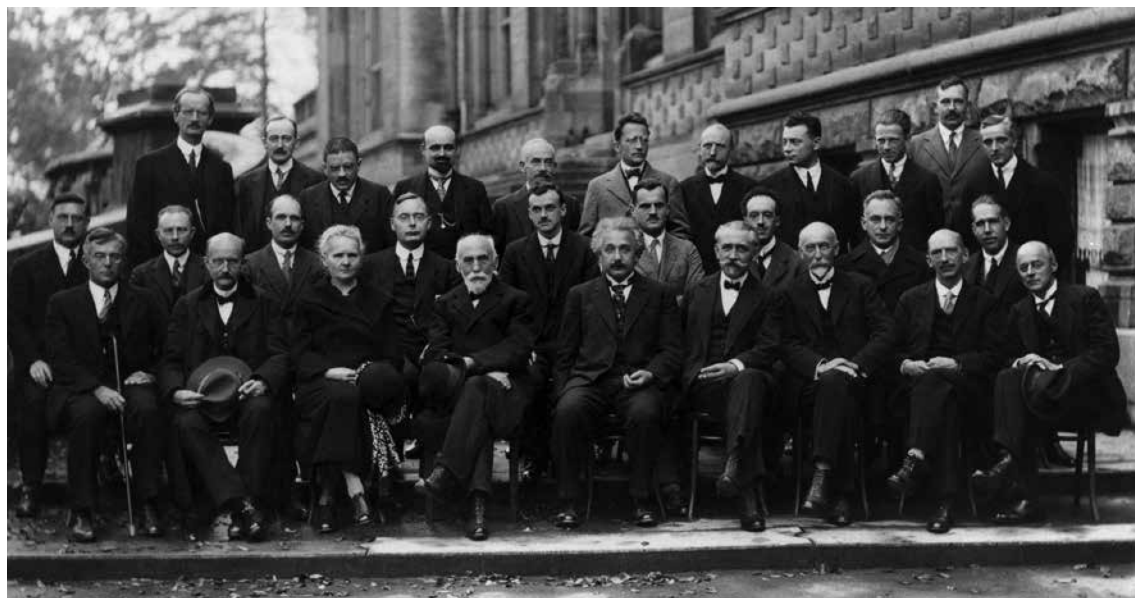
Los medios masivos hacen un trabajo muy malo en el manejo de la imagen de la ciencia. A los científicos los presentan solo como a gente extraña. La imagen que se trasmite de los químicos, por ejemplo, es que son gentes peligrosas para la sociedad y no se apunta la importancia que han tenido para salvar miles de vidas. Es difícil imaginarse un mundo sin polímeros o plásticos, por solo mencionar una de las cosas que ha descubierto la química. Los medios masivos no han convencido a la gente de que en los últimos 20 años han mejorado sus condiciones de vida gracias a la ciencia. Y es importante educar en estos conceptos, que los jóvenes conozcan los éxitos de la ciencia moderna, para que sientan deseos de investigar, de hacer ciencia."

Es importante a su vez tener presente lo que ocurrió en el pasado y que se ha hecho tradición. En efecto, en 2011 se cumplen 100 años desde que el químico e industrial belga **Ernest Solvay** auspició, pocos años antes del estallido de la Primera Guerra Mundial, el primero de una serie de encuentros internacionales de física denominados **Conferencias Solvay** que, cada tres años, tienen lugar en Bruselas. Además, se celebra este año la edición número veinticinco de estos encuentros por lo que he creído conveniente conmemorar estas efemérides de una forma muy especial. Gracias a su enfermiza filantropía, su afición a la ciencia y su gran popularidad, en 1911 *Ernest Solvay* se propuso organizar un congreso periódico para reunir a las mentes más privilegiadas del momento y tratar determinados temas abiertos de la **física y la química**. Para asistir a tales encuentros era menester una *invitación* especial, y los participantes debían concentrarse en un tema prefijado. Sin duda alguna, la **Quinta Conferencia Solvay** fue la más famosa y se celebró en octubre de 1927 en Bruselas. El tema principal fue "**Electrones y Fotones**", donde los mejores físicos mundiales discutieron sobre

la recientemente formulada **teoría cuántica**, dieron un sentido a lo que no lo tenía y se dieron cuenta que para describir y entender a la naturaleza se tenían que *abandonar gran parte de las ideas preconcebidas* por el ser humano a lo largo de toda su historia. *Científicos, visionarios... genios*, que tenían como objetivo comprender el *universo*, construyeron una nueva manera de entender el mundo y le llamaron **mecánica cuántica**. Los 29 científicos participantes en esta *Quinta Conferencia Solvay* formaron parte de una generación de oro como la que, posiblemente, no ha habido otra en la historia... **Diecisiete de ellos eran o llegaron a ser ganadores de Premio Nobel...**sobran las palabras. De este encuentro salió la que está considerada por la comunidad científica la **fotografía más importante y famosa de la historia de la Ciencia**, tomada por *Benjamin Coupré*, fotógrafo francés.

Pero, a diferencia de lo que ocurre en la mayoría de los Congresos que se desarrollan en la actualidad, este encuentro estuvo, afortunadamente, repleto de **tensiones y discusiones científicas**. En Bruselas, **Albert Einstein** debatió las "extrañas" conclusiones de la teoría cuántica con su más respetado y firme defensor, el "gran danés" *Niels Bohr*, comenzando una larga polémica entre estos dos maestros de la física del siglo XX, que se extendió hasta la muerte de *Einstein* en 1955. Los *choques dialécticos* entre los dos genios y sus discípulos fueron de gran fuerza, pero de un gran respeto, y muchas son las anécdotas que se cuentan acerca de sus enfrentamientos. Con toda curiosidad, la anécdota más famosa fue la protagonizada por *Albert Einstein* y *Niels Bohr* cuando discutían acerca del "*Principio de Incertidumbre*" de **Heisenberg**: *Einstein* comentó "**Dios no juega a los dados**", a lo que *Bohr* le contestó: "**Einstein, deje de decirle a Dios lo que debe hacer con sus dados**".

Pero si la fotografía es una auténtica joya, más aun lo son las imágenes que grabó en aquella cita **Irving Langmuir**, posteriormente *Premio Nobel de Química* en 1932 por sus investigaciones en la **Química de Superficie**. El día siguiente de esta fotografía –30 de octubre de 1927– mientras seguían resonando en su mente los históricos diálogos entre *Bohr* y *Einstein*, los conferencistas abordaron diversos trenes en la Estación Central de Bruselas de regreso a *Berlín, París, Cambridge, Gotinga, Copenhague*,



Fila superior: A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, Ed. Herzen, Th. De Donder, E. Schrödinger, E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R.H. Fowler, L. Brillouin.

Fila intermedia: P. Debye, M. Knudsen, W.L. Bragg, H.A. Kramers, P.A.M. Dirac, A.H. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr.

Fila inferior: I. Langmuir, M. Planck, M. Curie, H.A. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, Ch. E. Guye, C.T.R. Wilson, O.W. Richardson.

Viena y Zurich. Se llevaban consigo el conjunto de ideas más extraño jamás concebido por unos científicos. Interiormente, es probable que la mayoría de ellos coincidiera con Einstein en que esta locura denominada teoría cuántica no era más que un primer paso hacia una teoría más completa y sería desechada para dar lugar a algo mejor, más acorde con el sentido común. En la famosa fotografía aparece un joven físico alemán llamado Werner Karl Heisenberg conocido sobre todo por formular el Principio de Incertidumbre, una contribución fundamental al desarrollo de la teoría cuántica. Este principio afirma que es imposible medir simultáneamente de forma precisa la posición y el momento lineal de una partícula. Heisenberg fue galardonado con el Premio Nobel de Física en 1932. El principio de incertidumbre ejerció una profunda influencia en la física y en la filosofía del siglo XX. Pues bien, Heisenberg, uno de los 29 integrantes de la fotografía más importante de la ciencia, estuvo a cargo de la investigación científica del proyecto de la bomba atómica alemana durante la II Guerra Mundial. Durante muchos años subsistió la duda acerca de si este proyecto fracasó por impericia de parte

de sus integrantes o porque Heisenberg y sus colaboradores se dieron cuenta de lo que Hitler podría haber hecho con una bomba atómica... pero esto es otro debate al que algún día entraremos en Scientia. Heisenberg estuvo preso en Inglaterra después de la guerra.

Como se ha podido apreciar hay siempre una componente interesante que esta implícita en las problemáticas químicas desde muy antiguo hasta los tiempos modernos y futuros que involucran la Química de Superficies.

Comportamiento Químico-Físico de Macromoléculas en la interface aire-agua

La segunda parte de este artículo estará enfocada en un aspecto más acotado y que dice relación con el comportamiento de algunas macromoléculas específicas en una interface particular que en esta oportunidad se ha tomado la interface aire-agua. Tanto desde un punto de vista puramente académico como de proyección tecnológica, el interés en conocer el comportamiento de polímeros en superficies e interfaces ha venido creciendo a

una velocidad increíble las ultimas décadas. Su importancia radica en el interés mismo de las problemáticas que están implicadas y la aplicación tecnológica en áreas de Biomedicina (tensioagentes pulmonares, bicapas, liposomas, adsorción de proteínas), Alimentos, Farmacia y Cosmética (espumas, microemulsiones, liposomas) por una parte y en la Industria Petrolífera (emulsiones asfaltenos, recuperación terciaria), Nuevos Materiales y Nanotecnología (recubrimientos, microelectrónica supramolecular, sensores) por otra.

El hecho que las propiedades en el seno de las fases en contacto difieran de las propiedades en la región de contacto, es decir de la región interfacial, amerita un estudio acucioso del problema. Si a eso se suma los fenómenos que ocurren cuando en una dada interface se esparce una macromolécula, el sistema adquiere una relevancia muy particular. Es en este contexto que el artículo está concebido a raíz del año internacional de la Química.

Es un hecho conocido y ampliamente estudiado que macromoléculas que contienen en su estructura química una parte hidrofílica (polar) y otra hidrofóbica (no polar), es decir macromoléculas anfílicas o polianfílicos son capaces de asociarse en solución y acumularse en interfaces¹⁻⁵. La Figura 1 representa esquemáticamente una molécula anfílica y la orientación que adoptaría en una interface.

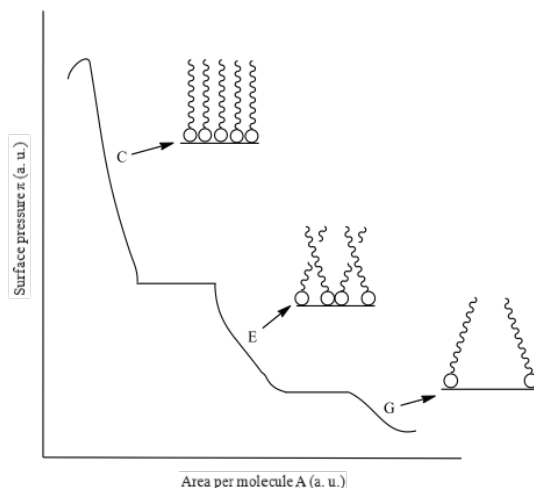
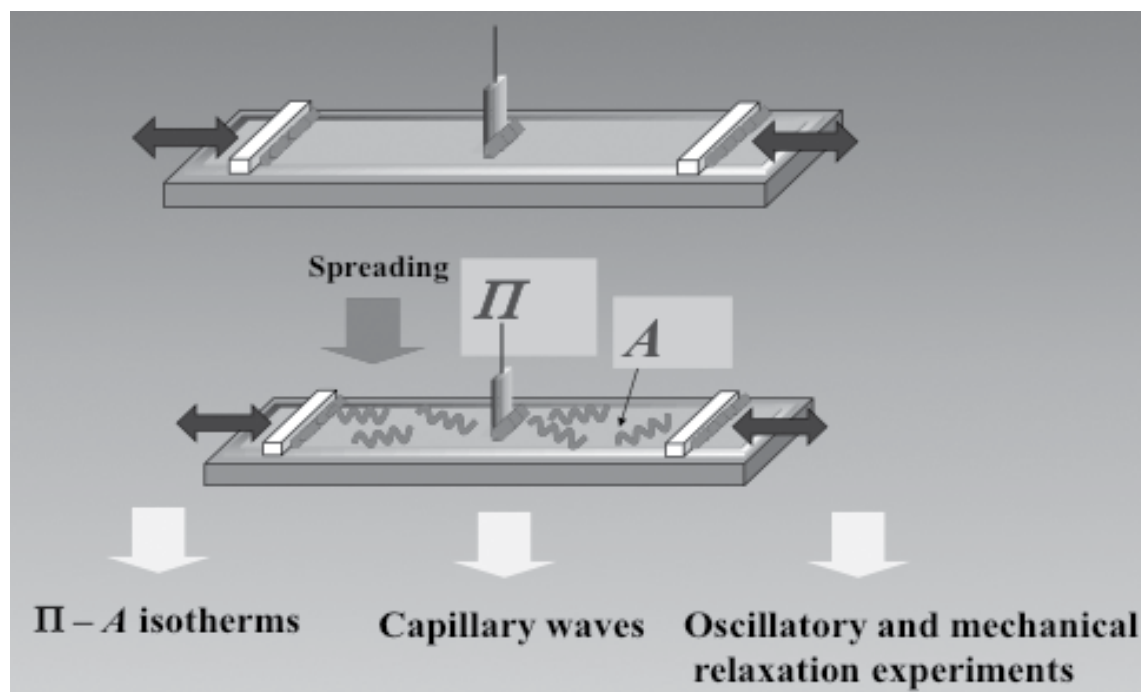
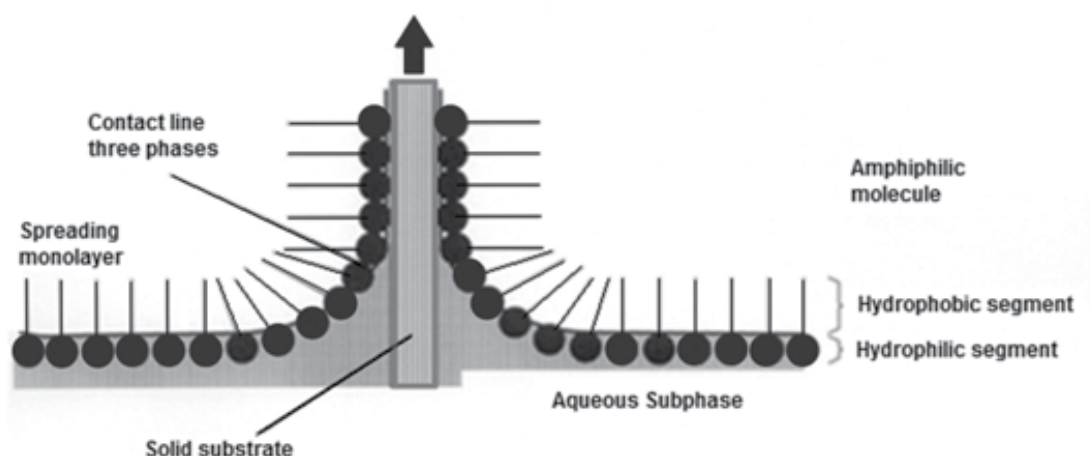
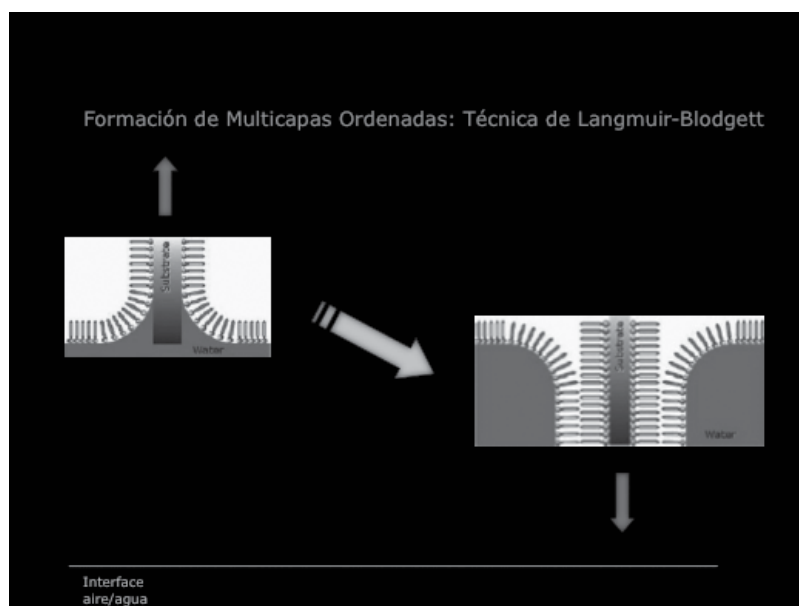


Figura 1. Representación esquemática de un polianfílo y la orientación que adoptaría en una interface, a distintas presiones y áreas superficiales.

Películas moleculares altamente ordenadas, con espesores que varían entre unos pocos nanómetros en el caso de una monocapa a varios cientos de nanómetros se están utilizando en la microelectrónica. (Nanociencia). Este tipo de nanosistemas se puede obtener mediante la obtención de monocapas de Langmuir. El esquema 1 ilustra las técnicas que proporcionan información experimental para estimar las características más relevantes de las monocapas poliméricas.



Esquema 1. Balanza superficial clásica de Langmuir.



Esquema 2. Formación de multicapas ordenadas mediante la Técnica de Langmuir-Blodgett (LB).

La interface aire-agua es un sistema muy adecuado para obtener macromoléculas ordenadas en un estado pseudodimensional. Un buen ejemplo de ello es el de moléculas de fullereno funcionalizado.

Como los materiales conteniendo fullerenos presentan propiedades de superconductividad, de fotoconductividad, comportamiento de óptica no lineal y algunas propiedades farmacológicas como inhibidor enzimático de la proteasa HIV, se ha tratado de obtener películas monomoleculares altamente ordenadas de fullerenos. De esta forma se pretendió obtener un mejor control de sus propiedades en un arreglo de tipo bidimensional⁶. Se pudo constatar que las monocapas de Langmuir de estos

materiales no eran verdaderamente estables como precursoras de la posterior formación de ensamblados o sistemas supramoleculares ordenados como los de tipo Langmuir-Blodgett (LB). (Esquema 2). Para obviar esta situación se sintetizaron derivados funcionalizados de fullerenos. Cuando la funcionalización implica cadenas hidrocarbonadas largas) 12 o mas átomos de carbono, se obtuvo un carácter suficientemente anfifílico para formar monocapas de Langmuir verdaderas y así cumplir con los objetivos propuestos⁶. La Figura 2 ilustra la estructura química del fullereno puro, C_{60} y de un fullereno funcionalizado.

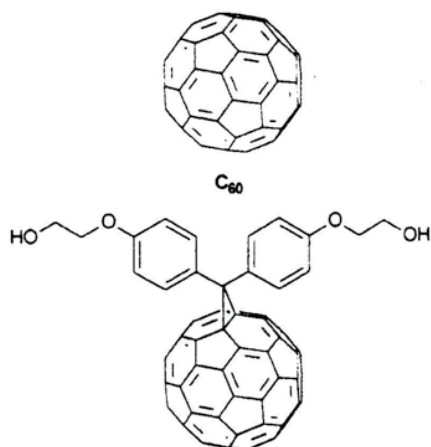


Figura 2. Estructura química del fullereno puro C_{60} y de un fullereno funcionalizado.

La mayoría de los estudios de monocapas de Langmuir se han efectuado con polímeros neutros^{7,8}, menores esfuerzos se han dedicado al estudio de polielectrolitos. Entendiéndose por estos últimos aquellas macromoléculas lineales que contienen cargas efectivas o grupos potencialmente ionogénicos. La limitante que presentan los polielectrolitos para este tipo de estudios es su solubilidad. Varias son las estrategias para obviar este problema. Por ejemplo el uso de cadenas parcialmente ionizadas de copolímeros al azar o en bloque. La Figura 3 muestra la estructura química de un copolímero de poli(n-alkil 4-vinilpiridiniun-co-vinilpiridina) cuaternizada al azar. Con un $n = 14^3$, que fue modificada para poder contar con una monocapa insoluble.

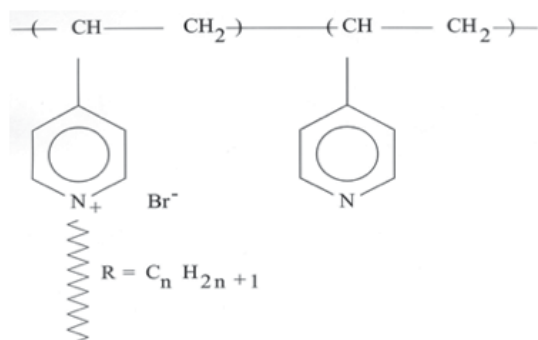


Figura 3. Estructura química del copolímero al azar de bromuro de poli(n-alkilo 4-vinilpiridinium-co-vinilpiridina) La Figura 4 muestra las isothermas superficiales experimentales de este sistema con diferentes grados de cuaternización como se indica en la Figura 4.

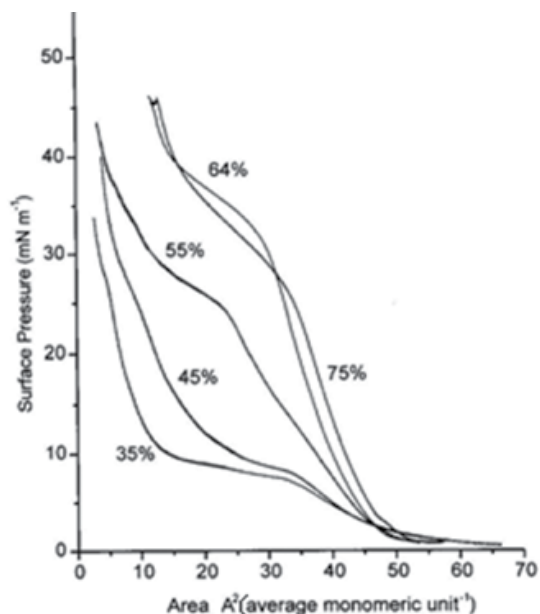


Figura 4. Isothermas superficiales presión-área (π -A) de bromuro de poli(n-tetradecilo 4-vinilpiridinium-co-4-vinilpiridina) con diferentes grados de cuaternización.

Como puede apreciarse la Figura 4 muestra las isothermas superficiales del bromuro de poli(n-tetradecilo 4-vinilpiridinium-co-4-vinilpiridina) con diferentes grados de cuaternización. Todas las isothermas presentan regiones de pseudoplateau a diferentes presiones superficiales, dependiendo del grado de cuaternización. De acuerdo a la posición pueden ser atribuibles a transiciones de fases superficiales que puede ser de un fluido isotrópico a una fase nemática. Este estudio se requiere como precursor de la obtención de películas finas soportadas en superficies sólidas. Es así como se utiliza la técnica de Langmuir-Blodgett, englobada dentro de las nanotecnologías. Esta técnica permite el control de la arquitectura a nivel molecular y así potenciar sus propiedades. Para conseguir esta ordenación molecular se precisa de una balanza de Langmuir (Esquema 1) con la que se puede obtener películas de espesor monomolecular sobre una superficie acuosa. Se registra la isoterma presión superficial - área por molécula (π - A) de donde se obtienen datos sobre tamaños moleculares, interacciones, información termodinámica (áreas de exceso, energías de Gibbs de exceso).

Asimismo, se evalúa la estabilidad de esta monocapa y su homogeneidad (microscopía de ángulo Brewster (BAM), espectroscopia de reflexión) y se observa como cambian estas propiedades al modificar la temperatura, el pH, la concentración de las sales en la subfase agua.

La transferencia de las películas de Langmuir sobre sustratos sólidos permite obtener las **películas de Langmuir-Blodgett (LB)**, con el espesor deseado (Esquema 2). Posteriormente, se procede a su caracterización mediante: UV-vis: La formación de agregados IR: Tipo de empaquetamiento, agregados SEM y AFM: Homogeneidad de la película (BAM) Conductividad.

Es interesante destacar como las superficies o interfaces pueden proporcionar una manera muy limpia y fantástica de obtener nanosistemas o ensambles nanoestructurados altamente ordenados. Dependiendo de la estructura química del sistema polimérico se alcanzan las propiedades deseadas.

Referencias

- L. Gargallo, D. Vargas, A. Leiva, D. Radic. J. Colloid. Inter. Sci. 301,607-611 (2006)
- L. Gargallo, D. Vargas, N. Becerra, C. Sandoval, C. Saldias, A. Leiva, D. Radic Macromol. Symp, 278, 80–88 (2009)
- B. Miranda, H.M. Hilles, R.G. Rubio, H. Ritacco, D. Radic, L.Gargallo, M. Sferrazza and F. Ortega, Langmuir, 25 (21), 12561-12568 (2009)
- L. Gargallo. Review. NMR Bulletin 35, 615-622 (2010)
- L. Gargallo, N. Becerra, C. Sandoval, M. Pitsikalis, N. Hadjichristidis, A. Leiva, D. Radic. J. Applied Polymer Sci. 000-000 (2011)
- M.P.Hernandez, F.Monroy, F.Ortega, R.G. Rubio. Langmuir,17, 3317-3328 (2001)
- A. Leiva, A. Farias, L. Gargallo, D. Radic. Eur .Polym. J. 44, 2589-2598 (2008)
- L. Gargallo, D. Radic. Curr. Trends Polym. Sci. 6, 121 (2001)

