

**CONSEJO INTERNACIONAL
DE UNIONES CIENTIFICAS
CHILE**

**EL CAMBIO GLOBAL DEL CLIMA
Y SUS EVENTUALES EFECTOS EN CHILE**

***COMITE NACIONAL DEL PROGRAMA INTERNACIONAL
DE LA GEOSFERA-BIOSFERA (IGBP)
ICSU***

JULIO, 1989

PRESENTACION

El presente documento, que cuenta con el auspicio de la Academia Chilena de Ciencias, ha sido confeccionado por un grupo de científicos chilenos que forman parte del Comité Nacional para el Programa Internacional de la Geosfera-Biosfera: Cambio Global (IGBP), con el fin de presentar sus posibles consecuencias para el caso especial de Chile. El IGBP fué creado por el Consejo Internacional de Uniones Científicas (ICSU) en Julio de 1987 ante la urgencia de conocer el devenir de nuestro planeta en respuesta a la creciente intervención humana. En conformidad a tal decisión, ICSU-Chile nombró un Comité Nacional formado por científicos activos en disciplinas relacionadas con la temática del programa. Para progresar más allá de lo que permiten los esfuerzos individuales y conformar un programa de actividad nacional, se requiere contar con recursos orientados a incentivar y coordinar el quehacer de los investigadores en torno a problemas de relevancia para el país. A través de este documento el Comité Nacional del IGBP intenta sensibilizar al medio nacional ante el desafío que plantea el cambio global del clima. A la vez pretende ser una carta de presentación ante las distintas instancias gubernamentales y del sector privado quienes eventualmente deben ser los sostenedores y los beneficiados de los resultados de un programa nacional de actividades científicas sobre este tema.

Santiago, Julio de 1989

COMITE NACIONAL DEL IGBP

Humberto A. Fuenzalida (Coordinador), Dep. de Geología y Geofísica, Univ. de Chile, Casilla 2777, Santiago. Teléf. 696 8790.

Patricio A. Bernal, Pont. Univ. Católica de Chile, Sede Reg. Talcahuano, Casilla 127, Talcahuano. Teléf. 54 2592.

Tomás R. Fonseca, INGEMAR, Casilla 1443, Valparaíso. Teléf. 21 6570.

Alberto Foppiano, Dep. de Física, Univ. de Concepción, Casilla 947, Concepción, Teléf. 22 8618.

Eduardo Fuentes, Laborat. de Ecología, Pont. Univ. Católica de Chile, Casilla 114-D, Santiago. Teléf. 222 4516/2614.

Ernst R. Hajek, Lab. de Ecología, Pont. Univ. Católica de Chile, Casilla 114-D, Santiago. Teléf. 222 4516.

Rubén Martínez, Dep. de Geología y Geofísica, Univ. de Chile, Casilla 2777, Santiago. Teléf. 696 2714.

Vivian Montecino, Dep. de Ciencias Ecológicas, Fac. de Ciencias, Univ. de Chile, Casilla 653, Santiago. Teléf. 271 2977.

Humberto Peña, Dirección General de Aguas, Min. Obras Públicas, Clasificador 78, Santiago. Teléf. 724506/428.

José Rutllant, Dep. de Geología y Geofísica, Univ. de Chile, Casilla 2777, Santiago. Teléf. 696 8790.

Fernando Santibáñez, Fac. de Ciencias Agrarias y Forestales, Univ. de Chile, Casilla 1004, Santiago. Teléf. 558 7042 /258.

José Valencia, Dep. de Ciencias Ecológicas, Fac. de Ciencias, Univ. de Chile, Casilla 653, Santiago. Teléf. 271 2865.

Carolina Villagrán, Dep. de Biología, Fac. de Ciencias, Univ. de Chile, Casilla 653, Santiago. Teléf. 271 2865/221.

Este trabajo fué confeccionado con las contribuciones de los siguientes miembros del Comité Nacional del IGBP:

Humberto A. Fuenzalida

Patricio A. Bernal

Carolina Villagrán

Eduardo Fuentes

Vivian Montecino

Fernando Santibáñez

Humberto Peña

Ernst Hajek

José Rullant

Resumen

Antecedentes Generales

*Causas del cambio
Magnitud y distribución geográfica*

Impacto en el medio ambiente

*Ecosistemas terrestres
Ecosistemas marinos y lacustres*

Problemática nacional de Chile

*Posible impacto climático:
temperatura y
precipitación*
*Impacto en los recursos:
recursos hídricos,
agricultura y silvicultura,
otros problemas*

Esbozo de un plan nacional de investigación

EL CAMBIO GLOBAL DEL CLIMA Y SUS EVENTUALES EFECTOS EN CHILE

Comité Nacional del IGBP

RESUMEN

La tierra enfrenta un cambio de sus condiciones climáticas a consecuencia del acentuamiento del llamado efecto invernadero. Por diferentes métodos se converge a un calentamiento medio global de 2,3 °C para el año 2050. Además, se espera que el calentamiento se presente más acentuado en las latitudes altas y moderado en las regiones tropicales. Aunque no hay duda que el cambio en las temperaturas afectará a otras variables climáticas, es muy difícil estimar el impacto en la precipitación, el viento o la nubosidad. Por lo mismo resulta más complejo aún imaginar las respuestas de los ecosistemas a este cambio.

Aunque 2 o 3 grados de calentamiento no parece una cifra de cuidado, sus consecuencias en términos de disponibilidad de recursos hídricos o del rendimiento de cosechas pueden ser enormes. Debido a la variación geográfica del impacto se espera que la distribución de los recursos naturales sufra cambios de importancia.

El margen de maniobra que la sociedad puede tener frente a este problema depende de la información con que se cuente a nivel regional. Por ello se esboza un plan nacional de investigación orientado a estimar el impacto regional en el clima y la respuesta de los ecosistemas más importantes del país.

1. Antecedentes generales

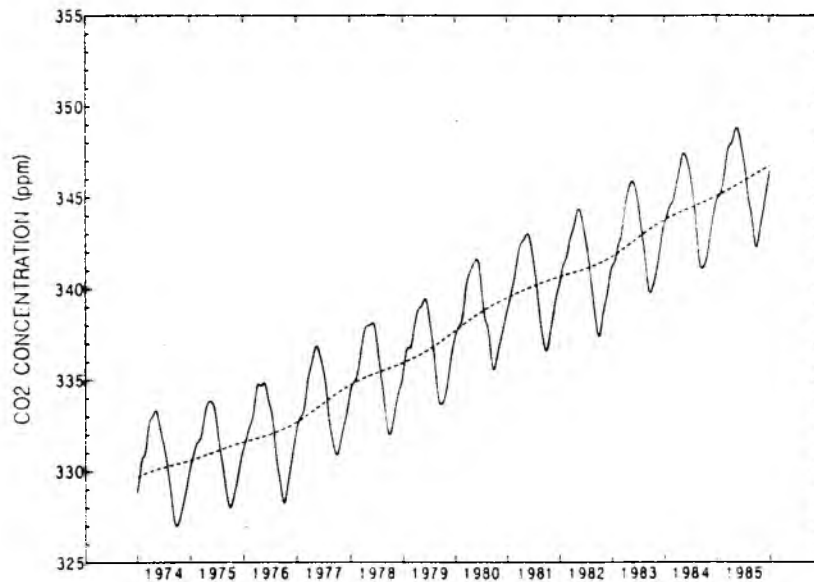
El clima del planeta ha cambiado constantemente a través del tiempo geológico. Durante el período cuaternario se ha caracterizado por repetidas oscilaciones en las temperaturas medias las que determinan los llamados ciclos glaciales-interglaciales. El último de ellos se inició hace 140.000 años. El máximo avance de los glaciares ocurrió hace 18.000 años y la transición al postglacial u Holoceno se ubica entre 12.000 y 10.000 atrás. Con anterioridad a la Revolución Industrial los cambios de clima se debieron originar en causas naturales, pero en el siglo XX el hombre ha empezado a interferir significativamente en su evolución.

Las primeras evidencias del aumento de anhídrido carbónico atmosférico fueron presentadas hace casi medio siglo (Callen-

dar, 1940). Ya en esa fecha se identificaba como causa al consumo de combustible fósil que iba en aumento desde el comienzo de la Revolución Industrial. No obstante, la incertidumbre en cuanto a la representatividad de las pocas mediciones disponibles y el papel que el océano juega como reservorio de este gas, arrojaban duda acerca de un aumento secular. Posteriormente, al efecto del anhídrido carbónico se ha sumado el de otros gases lo cual ha reducido las estimaciones del plazo en que su acumulación se hará sentir en las temperaturas.

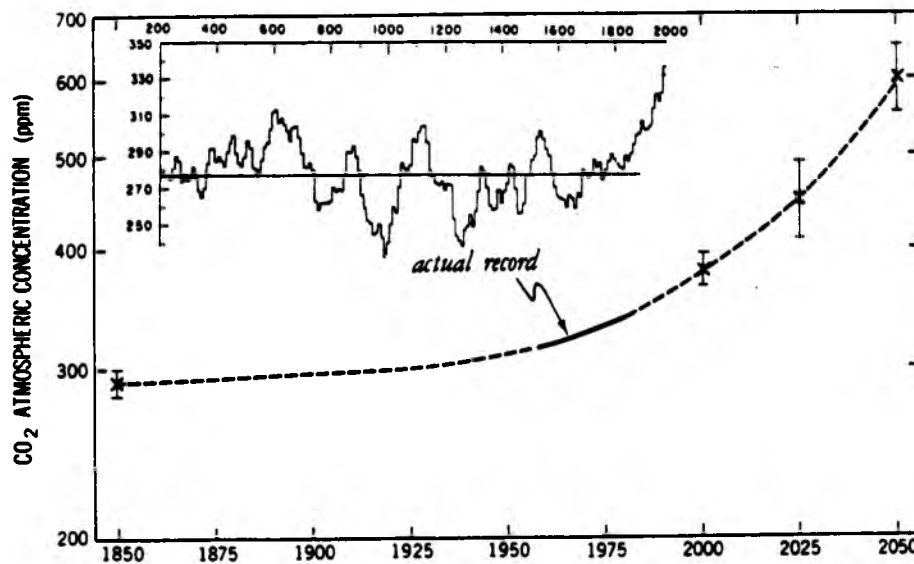
Las consecuencias climáticas de tal aumento es un asunto largamente debatido y hasta la fecha no existe unanimidad sobre ellas, aunque no hay duda acerca del efecto directo de la mayor cantidad de anhídrido carbónico y los otros

Figura 1



Variaciones recientes de la concentración atmosférica de anhídrido carbónico en ppm en Mauna Loa, Hawaii. (Fuente: Thoning et al., 1986)

Figura 2



Variación de la concentración atmosférica de anhídrido carbónico entre 1850 y 2050. El registro observado en línea continua, el resto son estimaciones. La variación entre el año 200 y el presente ha sido obtenido del contenido de carbono 13 en anillos de árboles (gráfico superior). (Fuente: Webster, 1985)

Tabla 1
VARIACION DEL CONTENIDO ATMOSFERICO DE GASES INVERNADERO

Componente atmosférica	Concentración		Aumento anual %
	Preindustrial	Actual	
CO ₂	280 ppm	344 ppm	0,5
CH ₄	0,7 ppm	1,65 ppm	1
N ₂ O	-	304 ppb	0,2
CFC-11	-	230 ppt	5
CFC-12	-	400 ppt	5

ppm: partes por millón en volumen; ppb: partes por billón en volumen; ppt: partes por trillón en volumen.

gases. La controversia se centra en los potenciales efectos compensatorios de otros procesos tales como la variación de la nubosidad y el incremento del contenido atmosférico de aerosoles. Cualquiera que sea el desenlace de ella, el planeta evoluciona hacia un nuevo régimen climático determinado en parte por la actividad humana. El cambio en perspectiva representa un fenómeno inédito, tanto por su magnitud y por la rapidez con que se presentará, como por las consecuencias que puede traer en una tierra superpoblada y con sus recursos exigidos al extremo.

El fenómeno encuentra hoy a las ciencias ambientales en una condición de desarrollo insuficiente para predecir en detalle el curso de los acontecimientos, lo cual ha llevado a concebir una ambiciosa empresa, el Programa Internacional del Cambio Global, que, recurriendo a todas las técnicas modernas de observación y procesamiento de información, intenta subsanar esta deficiencia y, si fuera posible, orientar el cambio para aminorar sus consecuencias negativas.

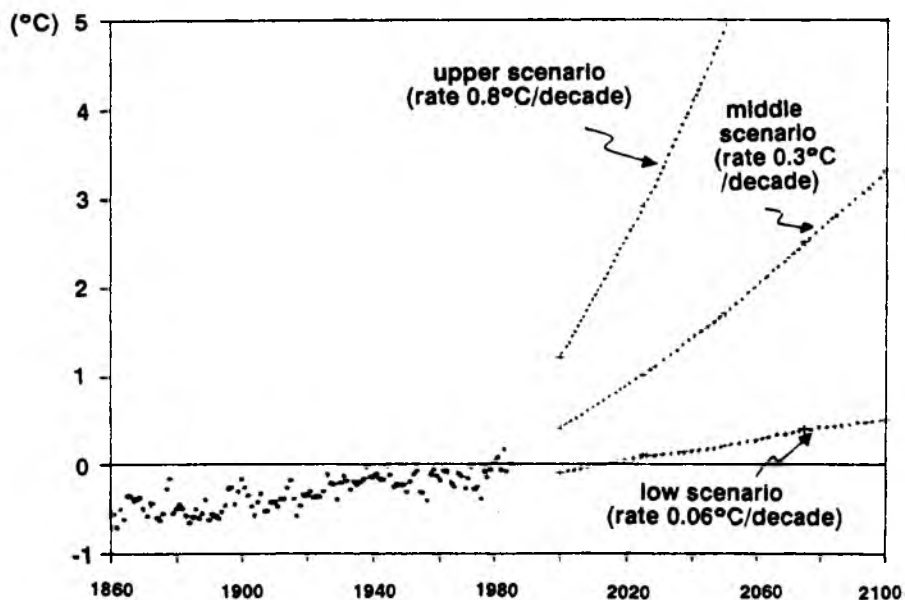
1.1 Causas del cambio.

Los resultados de una variedad de modelos numéricos (Schlesinger & Mitchell, 1987) concuerdan en que la Tierra enfrenta un inminente cambio en las

condiciones climáticas. *Este cambio está en marcha, no puede ser revertido en la próxima centuria* y su atenuación en plazos mayores demandará ingentes esfuerzos. Estos modelos, adolecen de imprecisiones cuyos efectos limitan su utilidad actual (Ramanathan et al., 1989), pero están basados en sólidos principios físicos y, perfeccionados, deben constituirse en la herramienta principal del pronóstico climático.

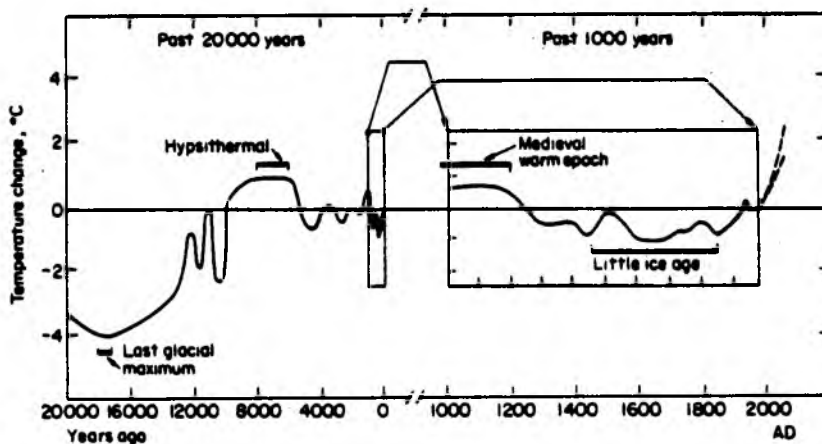
Los orígenes del cambio global del clima se hallan en la modificación cuantitativa y cualitativa de componentes minoritarios de la atmósfera y de la superficie del planeta a consecuencia de la creciente actividad tecnológica y agrícola, ocurrida especialmente en el Hemisferio Norte. En efecto, el seguimiento de las concentraciones atmosféricas de anhídrido carbónico (Figuras 1 y 2), metano, clorofluorocarbonos y óxidos de nitrógeno ha puesto en evidencia aumentos sostenidos de todos ellos (Tabla 1). Estos gases permiten el libre paso de la radiación solar hacia la superficie terrestre, pero son capaces de absorber parte de la radiación infrarroja emitida por ella. Este comportamiento discriminatorio frente a flujos radiativos de distinto origen, conocido como efecto invernadero, conduce a un aumento de temperatura en las capas de aire cercanas a la superficie (tropósfera) y a un enfriamiento en las capas altas (estratósfera).

Figura 3



Proyecciones del calentamiento global generado por el incremento del efecto invernadero. La curva central corresponde a un aumento de emisiones en concordancia con las tendencias actuales. la curva inferior corresponde a un escenario con severa disminución en las emisiones de gases invernadero y la curva superior a un escenario con emisiones aceleradas y alta sensibilidad climática según predicen algunos modelos. (Fuente: WMO/UNEP, 1988)

Figura 4



Cambio de temperatura global esperado comparado con las variaciones naturales durante los últimos 20.000 años. (Fuente: Wigley, 1981)

A esto debe sumarse los cambios que introduce el hombre en la superficie del planeta en sus esfuerzos por habilitar nuevas tierras para cultivo, crear rutas de comunicación o regular el caudal de los ríos. Ellos modifican las propiedades radiativas del suelo y las transferencias de energía hacia la atmósfera.

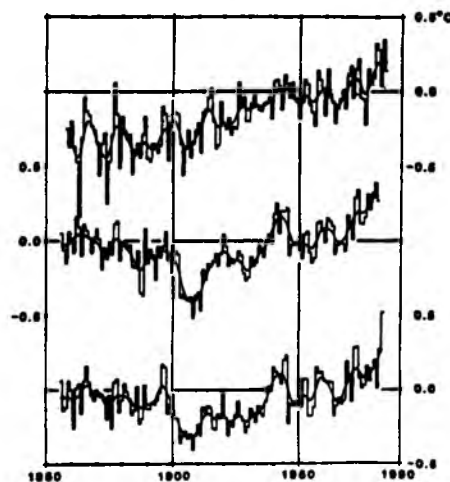
1.2 Magnitud y distribución del cambio global

Las estimaciones indican que durante los próximos 50 a 100 años el calentamiento elevará la temperatura superficial media del planeta en varios grados (Figura 3). La magnitud estimada es de $2,3 \pm 1,4$ °C (Pittock & Salinger, 1988). El error asociado desde ya informa del alto grado de incertidumbre de la estimación, pero el valor esperado excede los más altos registrados durante los últimos 10.000 años (Figura 4) y la rapidez con que ocurrirá representa una severa amenaza a los procesos de adaptación biológica y cultural. Este efecto está en marcha y debe empezar a ser discernible en los registros de temperatura entre las

variaciones de otro origen en un futuro próximo, aún cuando va a resultar difícil establecer una relación de causalidad inequívoca. Por ahora las observaciones instrumentales disponibles indican que durante los últimos 100 años la temperatura media del planeta ha aumentado en $0,5$ °C (Figura 5).

El aumento de temperatura presentará una apreciable variabilidad geográfica, siendo más importante en latitudes subpolares y en lugares altos debido al reforzamiento que recibirá allí por la fusión de los hielos y el consiguiente aumento de absorción de la radiación solar. Se estima que por cada grado centígrado de calentamiento el borde del hielo marino antártico se retirará un grado de latitud (Budd, 1988) exponiendo océano que absorbe un 93% de la radiación solar incidente en lugar del 65% absorbido por la superficie helada. Otra causa que contribuye a concentrar el calentamiento en las latitudes altas es la mayor resistencia que presenta allí la atmósfera a la mezcla vertical lo cual concentra el calentamiento en las capas próximas a la superficie.

Figura 5



Anomalías de la temperatura media del Hemisferio Sur durante el período instrumental. Curva superior para el aire, curva central para aire marino y curva inferior temperatura del mar. (Fuente: Jones et al., 1986)

2. Impacto en el medio ambiente

2.1 *Ecosistemas terrestres*

Se sabe que el cambio climático afectará a los ecosistemas terrestres, pero no es posible precisar cómo. Las distintas especies y suelos tienen tiempos de respuesta todavía desconocidos, pero está claro que difieren entre sí en órdenes de magnitud. Especies longevas, por ejemplo, responderán después que especies con ciclos de vida cortos (e.g. herbáceas y plagas), pero antes que los suelos. Por otra parte, las especies no responden sólo a los valores medios de las variables climáticas, que es lo más accesible, sino también a los extremos climáticos, cuya predicción es más difícil. Bien puede ocurrir que las sequías y los períodos lluviosos sean más, o menos, frecuentes aunque el promedio de las precipitaciones no cambie.

De esta forma, sólo es posible anticipar, a grandes rasgos, los cambios que sobrevendrán. Así, merced a un incremento de las precipitaciones, justificado más adelante, cabría esperar que en el norte del país se reduzca la franja altitudinal del Desierto de Atacama y aparezca vegetación a altitudes bajas de los Andes donde ahora no la hay. Es posible que la zona desértica se extienda, que zonas de semidesiertos como las que circundan a La Serena se desplacen hacia el sur y que la vegetación típica de Santiago invada regiones hoy día boscosas. En latitudes altas o en terrenos elevados otros ecosistemas pueden desaparecer porque las condiciones térmicas requeridas ya no existan sobre tierra firme. En regiones afectados por una disminución de las precipitaciones y un aumento de su variabilidad, los procesos erosivos quizás se intensifiquen y den lugar a más embancamiento de ríos y quizás inundaciones.

¿Cómo se desplazarán entonces las especies? ¿Cuáles serán capaces de sobrevivir al cambio térmico? ¿Cuán favorecidas se verán otras? ¿Aumentará la fre-

cuencia de incendios? Para hacer este tipo de predicciones se requiere de estudios específicamente orientados a responder este tipo de preguntas. En realidad no se sabe siquiera como reaccionarán las especies vegetales al solo cambio de temperatura. Para muchas, un período de bajas temperaturas es estrictamente necesario para su germinación. Tampoco se sabe como reaccionará el hombre ante un cambio de paisaje y de economía tan rápido como el que se avecina.

Es preciso preocuparse de las poblaciones confinadas a reservas y adaptadas a condiciones climáticas muy particulares. Deberán readecuarse muchos conceptos, como por ejemplo el de parque nacional, y el de conservación. ¿Qué y para qué conservar en una situación evolutiva como lo que se enfrenta? En realidad no se está acostumbrado a pensar en un mundo en que el clima, la flora, la fauna, la fertilidad de los suelos, la hidrología y el potencial agrícola y forestal cambian continuamente. ¿Cómo planificar en un mundo así? Sin duda se está frente a un gran desafío de adaptación cultural y biológica.

2.2 *Ecosistemas marinos y lacustres*

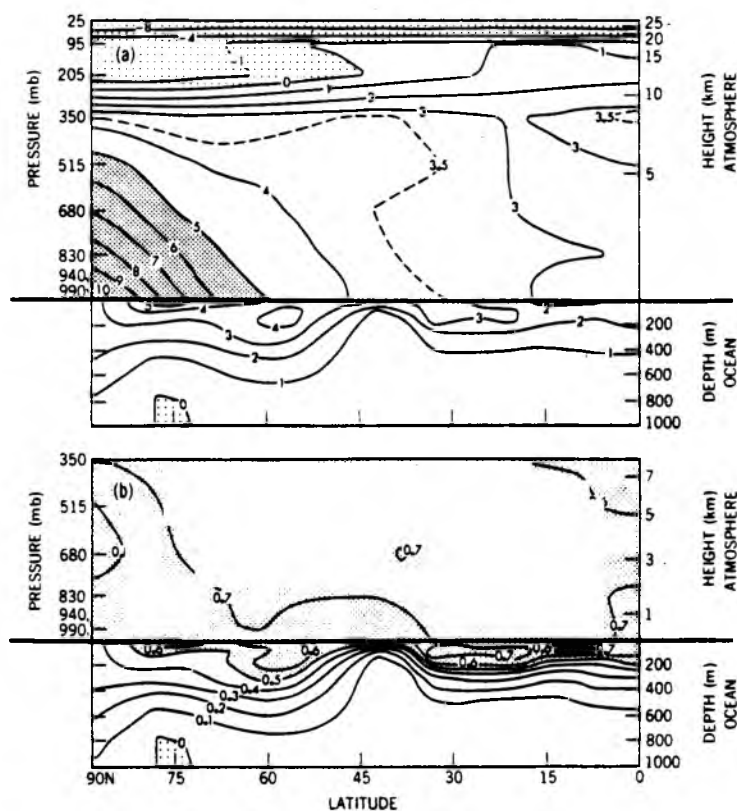
Las predicciones provenientes de los modelos globales de cambio climático son menos precisas y confiables para los océanos que para la atmósfera debido al desconocimiento sobre algunos procesos oceánicos fundamentales, y a la complejidad de modelar el sistema acoplado atmósfera-océano. No obstante, la mejor información disponible en la actualidad confirma las expectativas de cambio a escala global para los océanos del planeta:

Para los próximos 50 años se espera un calentamiento generalizado en las capas superficiales del océano, el que será mínimo en el océano ecuatorial y máximo en altas latitudes (aumento de 1 a 2 °C

se esperan entre 0 y 15° de latitud, y de 5 °C alrededor de 75° de latitud en el hemisferio norte). La penetración de este calentamiento hacia las capas subsuperficiales será máxima alrededor de los 60° de latitud: 4 °C a los 200 m. En promedio, se espera un calentamiento no menor a 1 °C hasta aproximadamente los 400 m de profundidad (Figura 6, Spelman y Manabe, 1984). Resultados de modelos que simulan cuencas similares a la del Pacífico Norte (Bryan y Spelman, 1985), sugieren otros cambios importantes: el aumento

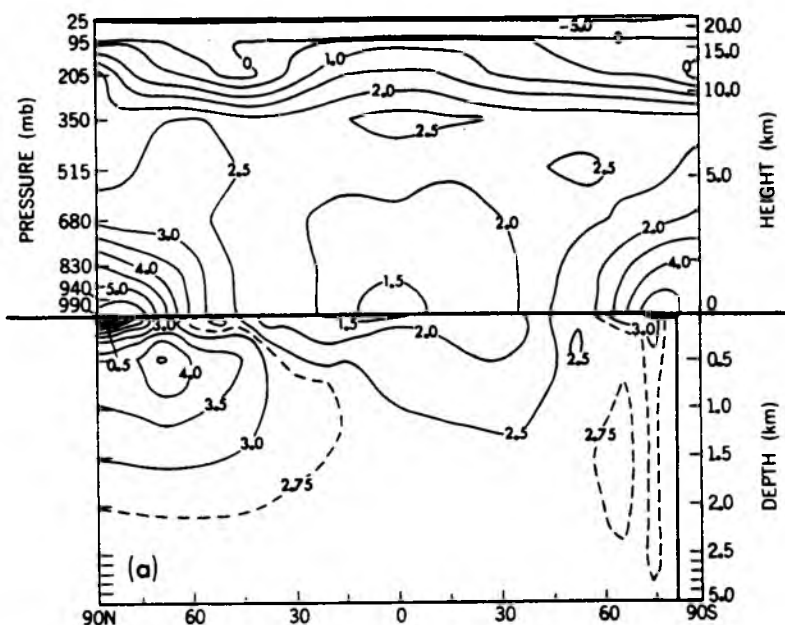
de la pluviosidad y el escurrimiento desde los continentes provocaría entre 40 y 60° de latitud una disminución de la salinidad superficial del océano, de hasta 3%. en los márgenes continentales. Los patrones de circulación serían alterados por la aparición de un tercer giro de corrientes en las altas latitudes y el colapso parcial de la circulación meridional debida al campo de densidad (termohalina). Solo recientemente ha sido publicado el primer esfuerzo de modelar realistamente los cambios oceánicos

Figura 6



Cambios de temperatura en el aire y el mar, debidos a una duplicación del CO₂ y promediados en longitud, para diferentes latitudes y alturas (profundidades) para el año 2010 en °K (arriba) y fracción, al mismo año, del cambio total (abajo). (Fuente: Spelman y Manabe, 1984)

Figura 7



Cambio de temperatura, promediado en longitud, para el quinto decenio luego de inicializar un modelo de océano-atmósfera acoplado con el contenido atmosférico de CO₂ duplicado. Perfiles verticales para diferentes latitudes en la atmósfera y océano. (Fuente: Bryan, Manabe y Spelman, 1988)

esperables en el hemisferio sur (Bryan y Manabe, 1988), Figura 7. En el hemisferio norte este trabajo reproduce un calentamiento del orden de 3 °C a los 200 m y 60° de latitud, pero para el hemisferio sur predice un calentamiento mucho menor, del orden de 0,5 °C (Figura 7). Estos resultados han sido altamente controvertidos, ya que aunque es esperable una asimetría en la respuesta climática entre ambos hemisferios, los resultados cuantitativos están en fuerte contradicción con los resultados de otros modelos atmosféricos.

Los efectos del cambio climático global sobre la ecología a escala regional son múltiples y difíciles de predecir con exactitud, en gran parte debido al limitado conocimiento sobre la compleja dinámica de comunidades y ecosistemas. Por otra parte el tema del impacto del cambio climático sobre los ecosistemas marinos,

hasta ahora, no ha recibido la atención que merece.

El calentamiento de los océanos provocará la extensión hacia los polos de condiciones tropicales y modificará la circulación desplazando las fronteras de las distintas masas de agua. Las comunidades del fondo (bénticas) intermareal experimentarán el impacto inmediato de estos cambios. Las islas oceánicas pueden ver alterada su capacidad de carga, al cambiar los niveles bio-productivos de las aguas que las rodean, afectando poblaciones que hacen uso de estos *habitats* restringidos: aves y mamíferos marinos. Los *habitats* pelágicos experimentarán expansión o contracción, según el sitio, afectando la distribución y composición de las comunidades que albergan. *Habitats* que juegan un papel clave en el ciclo de vida de especies que constituyen recursos, pueden verse disminuidos en extensión

(por ejemplo, las zonas de desove y retención larval de peces pelágicos afectando el reclutamiento a las poblaciones adultas). La disponibilidad de especies pelágicas oceánicas puede verse disminuida y aumentada su vulnerabilidad por cambios en la estructura de densidad, como ha sido documentado para las poblaciones de atún del Pacífico Tropical Oriental por efecto del desplazamiento vertical de la termoclina durante el fenómeno de El Niño (Sharp, 1987). El impacto potencial negativo, de estas alteraciones sobre recursos de indudable importancia económica, subraya la necesidad de estudiar con mayor detalle estos aspectos del cambio global.

En relación a los ecosistemas límnicos, cambios en el régimen de vientos, puede afectar la estructura y composición de la columna de agua aumentando su oxigenación o bien el espesor de la zona de mezcla vertical, profundizando la termoclina. Ello provocaría una reducción de *habitats* para las especies con intervalos estrechos de tolerancia térmica (estenotérmicas frías). La mezcla de la columna vertical favorece el reciclamiento de nutrientes que en conjunto con una mayor temperatura favorecerían un aumento de la tasa fotosintética de los productores

primarios (fitoplancton), pero por otra parte, el calentamiento disminuirá el oxígeno disuelto lo cual tiene un efecto opuesto. Es difícil predecir cuál de los dos dominará. Con una disminución de los caudales fluviales y de los tiempos de renovación y un aumento de erosión, también es esperable un incremento de la vegetación de interfase tierra-agua. Estos elementos producen por una parte liberación de compuestos orgánicos disueltos al agua y la descomposición de sus biomásas sufren una lenta mineralización. Todos estos procesos podrían llevar a una lenta eutroficación de los cuerpos de agua y a una disminución de las zonas eufóticas (iluminadas) que ya están sometidas a una aceleración de su productividad por la presencia de desechos urbanos e industriales y los derivados de actividades agrícolas y recreativas. En ecosistemas más extremos del tipo poco productivos (oligotróficos) un aumento del período estival resultaría favorable aún cuando también podría reducirse el *habitat* para las especies estenotérmicas. Al mismo tiempo cabe esperar un aumento del desprendimiento de hielos en lagos de climas fríos rodeados por glaciares y un aumento del período libre de cobertura helada.

3. Problemática nacional de Chile

Dentro de este marco de referencia de cambio global, incierta respuesta de los ecosistemas y limitado desarrollo de las ciencias observacionales en países como Chile, cabe preguntarse qué puede hacer la comunidad científica nacional frente a este perentorio desafío. En primer lugar hay un problema de organización: no es recomendable dejar la situación a merced de esfuerzos dispersos ni es factible pensar en cubrir todos los aspectos de un problema multidisciplinario por esencia. Sus aspectos globales van a ser desarrollados con ventaja por grupos de investigadores extranjeros con recursos apropiados para la tarea. No obstante,

existe un gran número de problemas locales, que se detallan más adelante, que afectarán profundamente a la generación de recursos y al bienestar nacionales. Esta es una labor que debe ser abordada por científicos chilenos en forma coordinada.

En su estado actual, la modelación numérica del clima es capaz de proveer estimaciones del cambio global de temperatura aunque con una incertidumbre apreciable. Sin embargo, al intentar obtener valores en una escala regional, el aumento en el error inutiliza las predicciones. Esto se debe, parcialmente, a la resolución espacial del modelo mismo la

que en la actualidad es de varias centenas de kilómetros. Aunque se trabaja activamente en el refinamiento de los modelos, se prevee que esta dificultad no será resuelta dentro del próximo decenio.

Por otra parte, el regimen climático de Chile esta determinado en grado importante por la presencia de la Cordillera de Los Andes, rasgo topográfico con un ancho típico similar o inferior a la resolución de los modelos. Resulta entonces imposible representar en ellos, con alguna fidelidad, la barrera andina y, como consecuencia, el clima del país cuya

extensión zonal también está por debajo de la resolución del modelo. No obstante, son justamente estimaciones en una escala regional las requeridas para fines de planificación y ya que la modelación numérica actual no entrega la información ni es posible aguardar que lo haga, es necesario recurrir a metodologías alternativas o complementarias. Todos estos esfuerzos deben estar respaldados por una comprensión cabal de los procesos físicos involucrados en el cambio global y ser compatibles con el marco general que provee la modelación numérica.

Figura 8 (a)

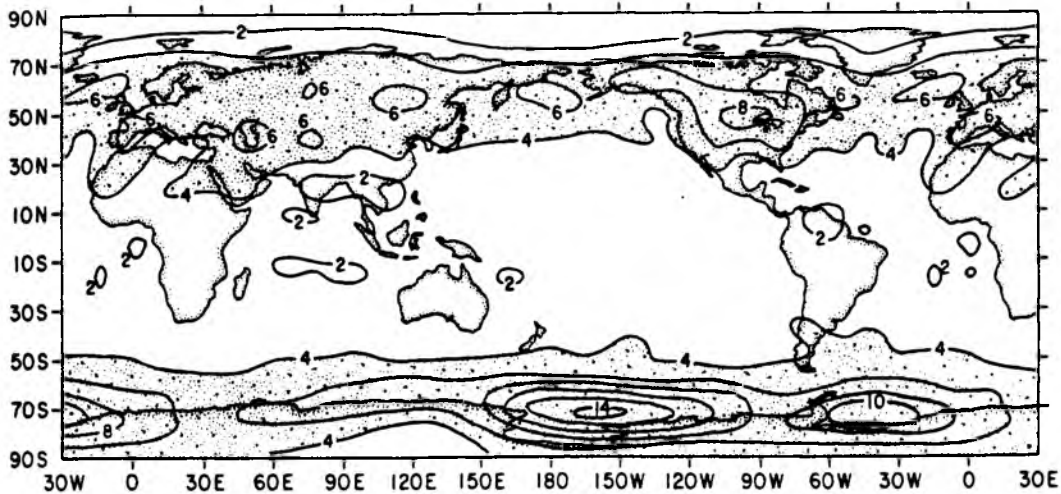


Figura 8 (b)

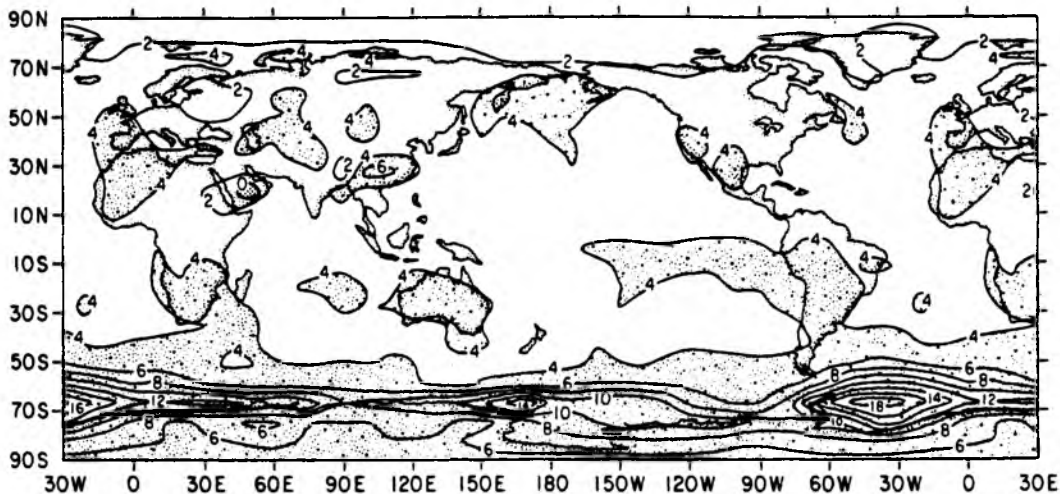
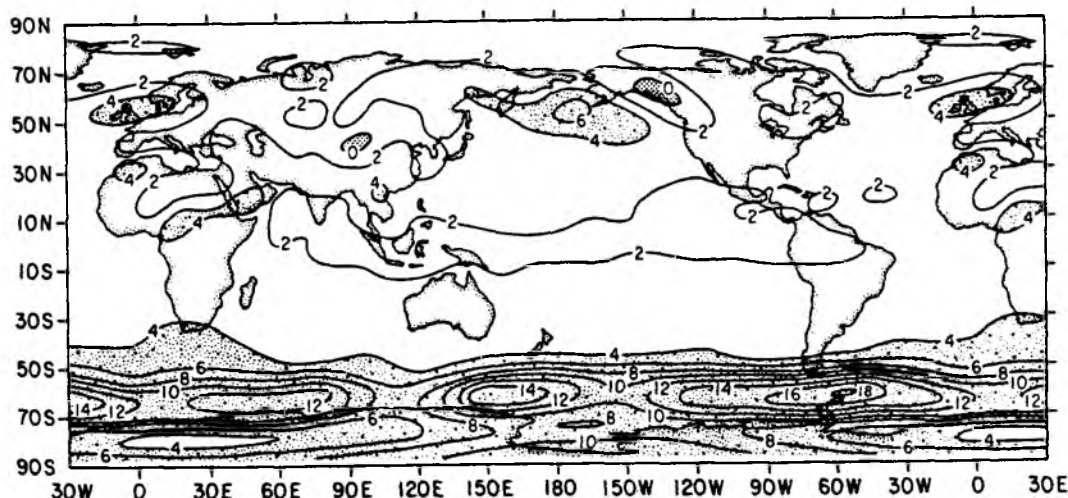


Figura 8 (c)



Calentamiento medio invernal (JJA) debido a una duplicación de la concentración atmosférica de anhídrido carbónico según tres modelos de Circulación General de la Atmósfera: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), Goddard Institute for Space Studies (GISS) y National Center for Atmospheric Research (NCAR). (Fuente: Schlesinger y Mitchell, 1987)

3.1 Posible impacto climático regional en Chile

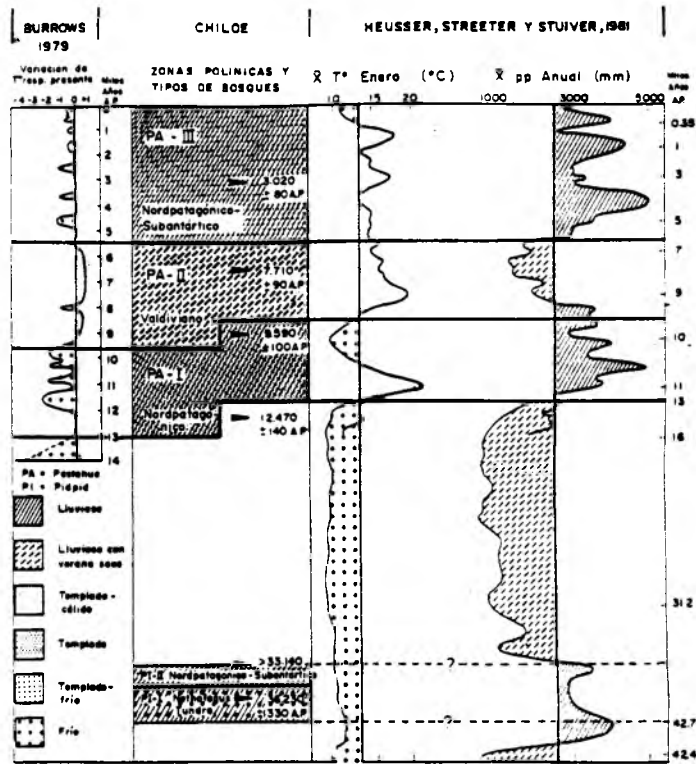
La estimación regional de las variaciones climáticas es un ejercicio difícil. Lo escaso de la información disponible representa una fuente de error importante y hace perentorio documentar los cambios pasados y actuales del clima regional. No obstante, con el fin de ilustrar en forma concreta el cambio en ciernes se intentará describir a continuación el panorama climático del país en unos 50 años más en términos de temperatura y precipitación con la información disponible.

3.1.1 Temperatura

Para el año 2030 en latitudes correspondientes a las de Arica (18°S) y Chiloé (42-43°S), los resultados de modelos atmosféricos (Figura 8) y estimaciones australianas (Pittock, 1988a) sugieren un calentamiento de 2 y 4 °C, respectiva-

mente. El impacto debería ser aún mayor para el extremo austral del país dada su proximidad al borde del hielo antártico. La extensión de estas estimaciones a Chile debe ser mirada con cautela ya que el efecto de la Cordillera de los Andes puede modificarlas. En ausencia de mejor información, su extrapolación para el impacto sobre Chile para el año 2050 sugiere cifras de 2 a 3 °C en la región norte, 3 °C para el centro del país, 4 °C en el sur y 5 °C en su extremo austral. El calentamiento máximo ocurrirá a los 70 grados de latitud para luego disminuir hacia el Polo (Figura 8). Las curvas de paleotemperaturas (Figura 9), reconstruidas en base a evidencia palinológica, por Heusser et al. (1981) para el sur de Chile y por Burrows (1979) para el hemisferio sur, muestran un aumento de 2 a 4 °C de las temperaturas durante un periodo anormalmente cálido del Holoceno, entre 5.000 y 9.000 años atrás que los trabajos de Berger (1988) asocian a causas astronómicas. El estudio más detallado de este

Figura 9



Variaciones de temperatura y precipitación en la región de P. Montt-Chiloé durante los últimos 40.000 años según estudios de polen fósil. (Fuente: Heusser, Streeter y Stuiver, 1981)

lapso puede así entregar antecedentes de lo que cabría esperar en un futuro período cálido similar aunque de distinto origen.

3.1.2 Precipitación

Más inciertas que las de temperatura son las eventuales variaciones en las precipitaciones. Los resultados de diferentes modelaciones numéricas muestran discrepancias regionales notorias. En tales condiciones sólo es posible intentar estimaciones cualitativas. En términos generales, un aumento de la temperatura del aire incrementará el contenido atmosférico de vapor de agua. Con ello los sistemas meteorológicos convectivos, cuya

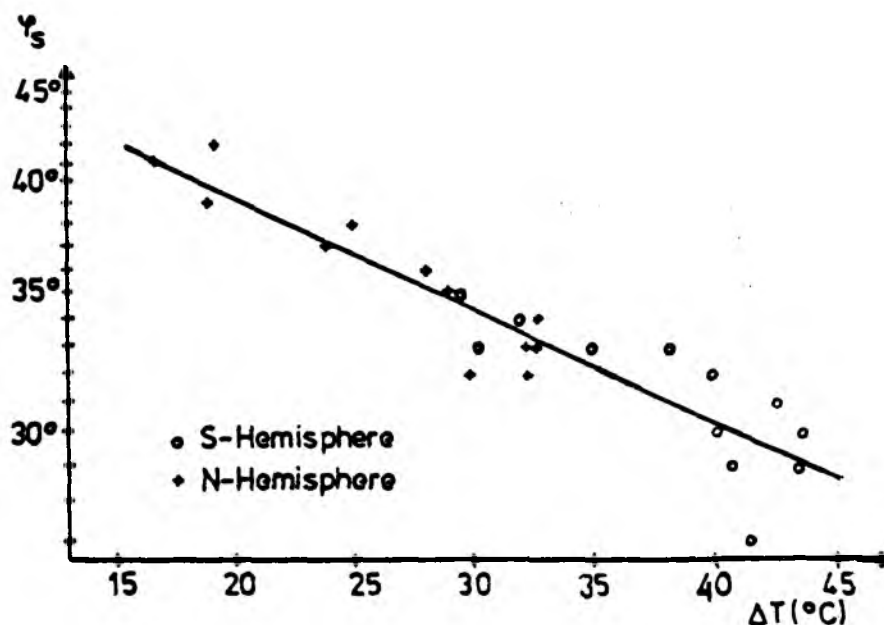
energía proviene de la liberación del calor latente almacenado en el vapor de agua, ganarán en intensidad. La única región de Chile donde actualmente este tipo de sistemas es importante, es el Altiplano del Norte Grande. Allí, todos los veranos se recibe una importante suma pluviométrica generada en una intensa actividad convectiva. Luego, cabría esperar que un eventual aumento de las temperaturas se asocie con una intensificación y expansión latitudinal hacia el sur del régimen de lluvias estivales del Altiplano. Por otra parte, en la zona central y sur del país las precipitaciones tienen origen en los frentes asociados con las depresiones migratorias en la región de los vientos del oeste. Ellas reciben su energía de aquella almacenada en el

contraste térmico entre las latitudes subtropicales y las regiones frías de la periferia antártica. Debido al calentamiento preferencial de ésta última región, tal contraste disminuiría con el consiguiente debilitamiento de la actividad meteorológica. Además, las variaciones de temperatura asociadas al ciclo estacional indican que con una disminución del contraste el anticiclón subtropical del Pacífico Sur Oriental sufrirá un desplazamiento hacia el sur (Figura 10) a la vez que las depresiones se situarán en latitudes mayores donde se concentrará el contraste meridional de temperatura. Todo ello sugiere una disminución de las precipitaciones en la región central y sur de Chile. En el extremo sur del país, en razón de su proximidad a la zona antártica, es posible que se produzca un aumento de las precipitaciones.

Considerando también la evidencia palinológica proveniente de Chile y Argentina, ésta muestra que durante el período cálido del Holoceno (hace 5.000-

9.000 años) disminuyeron las precipitaciones en Chile central y sur. Los registros de la zona central (32-35°S) muestran dominancia de formaciones arbustivas y herbáceas durante este lapso de calentamiento, mientras que los indicadores de bosques aparecen solamente durante el Holoceno superior y en la costa (Heusser, 1983; Villagrán, 1982; Margraf, 1983; D'Antoni, 1983). Los registros de la zona central-sur (37-43°S) exhiben expansión hacia el sur de las formaciones de bosque caducifolio de *Nothofagus* de la Región del Maule hasta 39°S en el Valle Longitudinal (Heusser, 1984) y 41°S en los Andes (Villagrán, 1988). El bosque valdiviano habría tenido a su vez una distribución más amplia en la región de Puerto Montt-Chiloé entre 41 y 43°S (Heusser, 1966). Para esta última región las curvas de paleoprecipitaciones (Heusser et al., 1981) muestran una disminución de cerca de 1500 mm de las precipitaciones medias anuales (Figura 9).

Figura 10

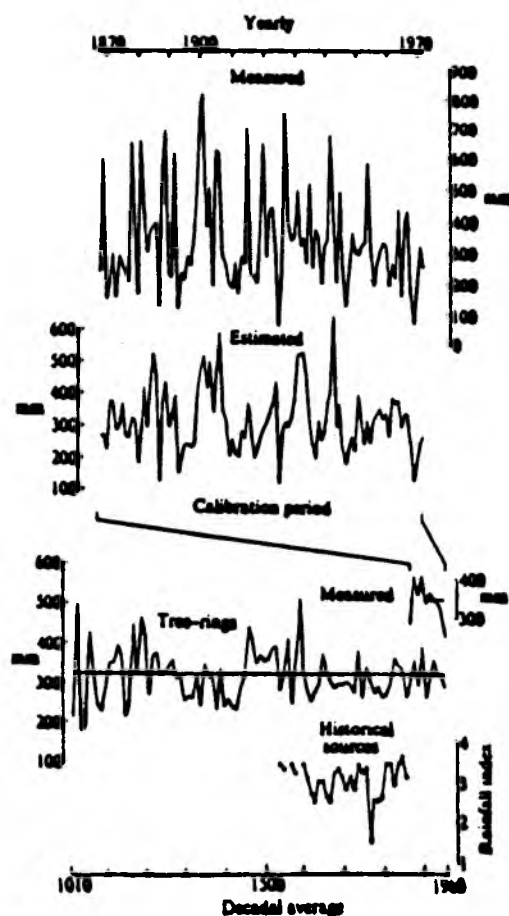


Latitud en que se ubican los centros anticiclónicos subtropicales según la diferencia de temperatura ecuador-polo mensual hemisférica. (Fuente: Flohn, 1981)

Con una resolución temporal más fina y para un periodo más reciente, las series climáticas deducidas de estudios del crecimiento de los anillos de los árboles (dendrocronología) para la región central de Chile (La Marche, 1978), Figura 11, indican que el período frío correspondiente a la Pequeña Edad del Hielo, que llevó a Europa inviernos desusadamente crudos entre 1400 y 1700 se caracterizó por un clima lluvioso al que precedieron condiciones secas. Esto sugiere, por oposición, que en condiciones cálidas como las que

se espera la precipitación en Chile central podría disminuir. Por otra parte, los registros instrumentales, desde La Serena a Valdivia, exhiben una disminución de la precipitación anual durante el presente siglo. Sin embargo, la información es demasiado fragmentaria para permitir proyecciones concluyentes. Bien podría ocurrir que la disminución de la precipitación medida obedeciera a mecanismos climáticos naturales y no al incremento del efecto invernadero.

Figura 11



Variaciones de la precipitación en Chile Central durante el último milenio obtenidas por técnicas dendroclimáticas. En la parte superior se muestra la relación entre los datos de anillos de árboles y la precipitación medida en Santiago, en la parte central la serie pluviométrica inferida y en la parte inferior información semicuantitativa de recopilaciones de documentación histórica. (Fuente: La Marche, 1978)

3.2 Impacto en los recursos

La balanza comercial de Chile se caracteriza por una exportación de productos primarios y una importación de productos manufacturados. Esta característica lo hace particularmente vulnerable a un cambio ambiental que afectará a sectores tan importantes como la minería, la producción agrícola y forestal y la industria pesquera, entre otros. A continuación se señalan las formas más evidentes que puede adoptar el impacto del cambio en algunas de estas actividades.

3.2.1 Recursos hídricos

Una suposición básica de la gran mayoría de los métodos de la ingeniería hidrológica es el carácter estacionario de las series de observaciones. Tal hipótesis ya no es válida. En particular, se ignoran los cambios que se producirán en la distribución de frecuencias de las precipitaciones, cuestión decisiva en relación a los recursos hídricos, ya que determina la magnitud de las crecidas y la extensión de los periodos secos. En el impacto del cambio climático en relación a los recursos hídricos de Chile, se identifican los siguientes aspectos importantes (Peña y Brown, 1989):

- i) En las cuencas pluvionivales en general, el calentamiento global al provocar un ascenso del nivel de la línea de nieves conducirá a un aumento en el área de la cuenca aportante durante las crecidas. En las principales cuencas de la zona central del país cuyos cauces alcanzan la Depresión Intermedia, un aumento de 3 °C significa un ascenso de 500 m de la línea de nieves y una duplicación del área aportante. Esto obligará al reacondicionamiento de numerosas obras y a la construcción de otras para la protección de la población y las actividades ribereñas.
- ii) En el mismo tipo de cuencas del Norte Chico y la Zona Central, el aumento de temperatura acelerará el derretimiento de las nieves, incrementando los caudales de invierno y primavera en desmedro de los de verano y otoño. Una modelación preliminar del derretimiento en condiciones 3 °C más cálidas indica una disminución de un 20% en los caudales de verano. La capacidad de riego de los ríos se verá afectada en la misma fracción con un fuerte impacto en la agricultura y demandará la construcción de nuevas obras de regulación estacional.
- iii) La mayor temperatura del aire debe llevar a un aumento de la tasa de evapotranspiración con la correspondiente disminución de la fracción de la precipitación que contribuye a la escorrentía. En zonas húmedas, un aumento de 3 °C puede significar un menor rendimiento hídrico de 10 a 15%, a igualdad de condiciones de precipitación, y una cifra varias veces mayor en las cuencas pluviales de las zonas áridas y semi-áridas. En las cuencas nivales es difícil hacer una estimación.
- iv) Otro aspecto relevante es la variación del nivel medio del mar. Las estimaciones actuales sugieren que éste aumentará entre 20 y 80 cm en los próximos 100 años (Lutjeharms, 1988), cifra obtenida sobre la base del aumento de 10 cm ocurrido en el último siglo en que la temperatura global aumentó en 0,5 °C. En algunas localidades bajas esto puede ser importante al afectar la salinidad de pozos y vertientes costeras, las obras de protección y la depositación de sedimentos.

A todo esto se debe sumar el efecto de las eventuales variaciones pluviométricas.

cas las que, según se ha visto, involucran un alto grado de incertidumbre. No obstante, el cambio térmico conlleva, en Chile central, un aumento de las diferencias estacionales de escorrentía y un acentuamiento de los periodos secos y las inundaciones. Ante esta perspectiva parece recomendable planificar obras de regulación estacional.

3.2.2 Agricultura y silvicultura

Para la agricultura el proceso en marcha tiene algunos aspectos negativos y otros favorables.

El aumento de la temperatura presenta como consecuencia favorable la reducción del período con heladas a las cuales hay muchos cultivos sensibles. Pero por otra parte atenúa el régimen de frío invernal, elemento muy importante en algunas especies frutales, por lo cual éstas deberían desplazarse hacia el sur del país. Otro aspecto negativo es la mayor precocidad de los ciclos biológicos, la cual disminuye la productividad en frutales y cultivos tradicionales.

La disminución de la pluviosidad en la zona central y centro-sur afecta negativamente la productividad del secano costero e interior con un menor rendimiento de cereales y leguminosas y una menor productividad de las praderas naturales; además, el contenido de humedad en el suelo puede ser insuficiente para la agricultura hacia fines del verano. La menor disponibilidad de agua de riego por cuenca conlleva un aumento de costos y un desplazamiento de los cultivos menos rentables.

En la zona austral, el potencial aumento de la pluviosidad, implica mayores dificultades de explotación de los ecosistemas y un acentuamiento de los riesgos de erosión.

Por otra parte, el aumento de anhídrido carbónico atmosférico debe producir un aumento en la fotosíntesis y disminuir la tasa de transpiración por carbono asimilado, haciendo más eficiente el uso

del agua por los vegetales (Pittock, 1987). Sin embargo, este efecto depende de la especie, favoreciendo más a unas que a otras, lo cual debe conducir a cambios en la composición de la vegetación natural, en los productos a explotar, y en el control de malezas.

Los registros de polen del sur de Chile exhiben cambios importantes en la distribución de las especies forestales autóctonas durante el lapso de calentamiento postglacial. Las variaciones provocadas por el efecto invernadero podría ser de magnitud comparable. Probablemente las especies forestales más afectadas sean aquellas más higrófilas y resistentes al frío que actualmente se distribuyen en las cimas de la Cordillera de la Costa, tales como las coníferas. Para el bosque de coníferas del Hemisferio Norte se han estimado desplazamientos de 500 a 1000 km los que ocurrirían en intervalos de varios siglos (Pittock, 1987).

Difícil de predecir, pero de gran importancia, es el aumento de la frecuencia de incendios forestales determinada por la mayor temperatura y la disminución de la humedad del suelo.

3.2.3 Otros problemas

En relación a la actividad minera el cambio climático tendría un impacto favorable si no fuera por el aspecto hídrico ya analizado. En general las faenas mineras están concentradas en la región árida o semi-árida del país, y frecuentemente en el interior de la Cordillera de Los Andes donde la nieve dificulta las actividades invernales. En este último aspecto el calentamiento global implicará un alivio a los problemas de extracción y transporte, pero la disminución de la disponibilidad de agua puede imponer una restricción más importante.

La situación actual del problema de la disminución primaveral del ozono estratosférico, que se encuentra limitada al continente antártico, puede ser modificada. Las reacciones químicas involucradas

requieren de temperaturas bajas que sólo ocurren en el sector antártico en invierno y primavera. El dominio geográfico de este fenómeno puede ser ampliado por el incremento del efecto invernadero que en los niveles estratosféricos, a diferencia de

la atmósfera baja, da lugar a un enfriamiento. Los efectos de la disminución de la capa de ozono sobre la biosfera son en gran medida desconocidos y deberían ser objeto de seguimiento por los países directamente afectados como Chile.

4. Esbozo de un plan nacional de investigación.

En conclusión, el cambio climático en marcha, por su magnitud e inminencia, representa un aspecto que no puede ignorarse en ninguna planificación del quehacer nacional. Si se estaba acostumbrado a mirar el pasado reciente como evidencia del futuro próximo, esta ya no es una suposición aceptable. Si hoy día se revisan las estadísticas pluviométricas de los últimos 50 años para diseñar el vertedero de una represa que deberá entrar en operación en el decenio próximo y servir por un período de 100 años, se puede estar cometiendo un grave error. Análoga es la situación en la planificación de largo plazo de cualquier actividad sea la silvicultura, la pesca, la explotación minera, el abastecimiento de agua, el desarrollo industrial o la agricultura. Sin embargo, para poder estimar la evolución del clima en el futuro mediato es preciso reunir el mayor acopio de antecedentes posible en una escala regional, pues sólo de ese modo se estará en condiciones de ofrecer escenarios realistas para la planificación del desarrollo nacional. Más aún, si se pretende hacer alguna estimación de la oferta y demanda futura de algún bien en el mercado internacional, será preciso tener en cuenta cómo afectará el cambio climático global a su producción en otras regiones del mundo. Por ejemplo, considerando el efecto fertilizante producido por el aumento de anhídrido carbónico atmosférico y el incremento de temperatura, el cuadro global de oferta y demanda de madera y sus productos puede ser severamente afectado. Usando un modelo, un instituto austriaco ha estimado el impacto proveniente del aumento de producción en los bosques coníferos del

hemisferio norte sobre el mercado mundial para 50 años más. Los resultados, que están lejos de poder ser considerados como concluyentes, indican que los precios de troncos caerían entre un 10 y 20% y los de la pulpa entre 30 a 50%. En Chile los precios bajarían en un 20% (troncos) y un 40% (pulpa) aunque habría un leve aumento en la producción. Entre los países del hemisferio norte el mayor beneficiado sería Finlandia cuya producción aumentaría en más de un 50%.

Este panorama define un área prioritaria para la comunidad científica nacional. Es urgente que ella intensifique su actividad en ciertas áreas que ayuden a precisar las variaciones regionales del clima. Una de particular importancia es la comparación con épocas climáticas remotas en las cuales hayan prevalecido condiciones, sino iguales al menos análogas a lo que se espera. El estudio de paleoclimas recurre a una amplia gama de técnicas. Algunas de ellas son practicadas en el país o pueden llegar a serlo y con un oportuno apoyo pueden ofrecer considerable ayuda en la inferencia de variaciones climáticas esperadas en una escala regional.

Otra línea de investigación que puede iluminar acerca de las variaciones regionales es el estudio cuidadoso de los registros instrumentales disponibles en los cuales deben empezar a distinguirse los cambios climáticos forzados por el acentuamiento del efecto invernadero. En este tipo de investigación se debe proceder con extrema cautela, pues la pequeña señal que se busca debe ser extraída entre otras mayores debidas a la variabilidad natural del clima, al desarrollo

urbano y los cambios de instrumentación y metodologías observacionales.

Simultáneamente, es recomendable estudiar la sensibilidad de los componentes bióticos y abióticos de los ecosistemas del país a los cambios de temperatura y precipitación, así como desarrollar simulaciones numéricas del clima con alta resolución espacial, las que, adecuadamente perfeccionadas, deben constituirse en las herramientas preferidas en las estimaciones de los cambios del ambiente.

A la luz de los antecedentes que

aporten estas actividades, es necesario comenzar a considerar el impacto que los cambios en perspectiva tendrán sobre la explotación de recursos naturales y sobre la sociedad con el fin de proyectar medidas que atenúen o aprovechen sus efectos. Finalmente, es preciso mantenerse informados de los resultados de esfuerzos análogos en otras partes del mundo, para aprovechar las oportunidades que el cambio climático pueda ofrecer para planificar la actividad productora nacional.

LISTA DE REFERENCIAS CITADAS

- Berger, A.**, 1988: Milankovitch theory and climate. *Rev. of Geophysics*, 26, 4, 624-657.
- Bryan, K., S. Manabe y M. J. Spelman**, 1988: Interhemispheric asymmetry in the transient response of a coupled ocean-atmosphere model to a CO₂ forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 851-867.
- Budd, W.**, 1988: IGBP SH Workshop, Swazilandia.
- Burrows, C. J.**, 1979: A chronology for cool-climate episodes in the Southern Hemisphere 12.000-1.000 yr. *B.P. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology*, 27, 287-347.
- Callendar, G. S.**, 1940: Variations on the amount of carbon dioxide in different air currents. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 66, 395-400.
- D'Antoni, H. L.**, 1983: Pollen analysis of Gruta del Indio. *Quaternary of South America & Antarctic Peninsula*, 1, 83-104.
- Ember, L. R., P. L. Layman, W. Lepkowski y P. S. Zurer**, 1986: Tending the global commons. *Chem. and Eng. News*, Nov. 24, 1986.
- Flohn, H.**, 1981: Scenarios of cold and warm periods of the past. En *Climatic variations and variability: facts and theories*, 689-698. Reidel Publ. Co.
- Heusser, C. J.**, 1966: Late Pleistocene pollen diagrams from the province of Llanquihue, Southern Chile. *A. Philos. Soc. Proc.*, 110, 269-305.
- Heusser, C. J., S. S. Streeter y M. Stuiver**, 1981: Temperature and precipitation record in Southern Chile extend to 43.000 yr. ago. *Nature*, 294, 65-67.
- Heusser, C. J.**, 1983: Quaternary pollen record from Laguna de Tagua Tagua, Chile. *Science*, 219, 1429-1432.
- Jones, P. D., S. C. B. Raper y T. M. L. Wigley**, 1986: Southern Hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984. *Jour. Clim. & Applied Meteorology*, 25, 9, 1213-1230.
- La Marche, V. C. Jr**, 1978: Tree-ring evidence of past climate variability. *Nature, Climatology Supplement*, November 1978.
- Lutjeharms, J.**, 1988: IGBP SH Workshop, Swazilandia.
- Peña, H. y E. Brown**, 1989: La evolución y aprovechamiento de los recursos hídricos del país en el siglo XXI. Comunicación personal.
- Pittock, A. B.**, 1987: Forests beyond 2000-effects of atmospheric change. *Australian Forestry*, 50 (4), 205-215.

- Pittock, A. B., 1988: The greenhouse effect and future climatic change, En "Recent Climatic Change", Belhaven Press, London.
- Pittock, A. B., 1988: Climatic catastrophes: the local and global effects of greenhouse gases and nuclear winter. En "Natural and man-made hazards", Reidel Publish. Co.
- Pittock, A. B. & J. Salinger, 1988: IGBP SH Workshop, Swazilandia.
- Ramanathan, V., B. R. Barkstrom and E. F. Robinson, 1989: Climate and the Earth Radiation's Budget. *Physics Today*, Mayo, 1989, 22-32.
- Schlesinger, M. E. & J. F. B. Mitchell, 1987: Climatic Model simulations of the equilibrium climatic response to increased carbon dioxide. *Rev. of Geophysics*, 25, (4), 760-798.
- Sharp, G. D., 1987: Climate and fisheries: cause and effect of managing the long and short of it all. En A. I. L. Payne, J. A. Gulland y K. H. Brink (Eds) *The Benguela and comparable ecosystems*, S. Afr. J. Mar. Sci., 5, 811-838.
- Spelman, M. J. y S. Manabe, 1984: Influence of oceanic heat transport upon the sensitivity of a model climate. *J. Geophys. Res.*, 89(C1), 571-586.
- Thoning, K. W., P. P. Tans y W. D. Komhyr, 1989: Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974-1985. *J. Geophys. Res.*, 94(D6), 8549-8565
- U. S. National Academy of Sciences, 1974: Understanding climate change: a program for action. Report of the Panel on Climate Variations to the U. S. Committee for GARP.
- Villagrán C., 1980: Vegetationsgeschichtliche und pflanzensocziologische Untersuchungen im Vicente Perez Rosales Nationalpark (Chile). *Diss Botanicae*, 54, 1-165.
- Villagrán, C., 1982: Estructura florística e historia del bosque pantanoso de Quintero (Chile, 5a Región) y su relación con las comunidades relictuales de Chile Central y Norte Chico. *Actas III Congreso Geológico Chileno*, A377-A402.
- Webster, P. J., 1985: Great events, grand experiments: man's study of the variable climate-Part II: prospects of a warming earth. *Earth and Mineral Sciences*, 55, 21-24.
- Wigley, T. M. L., 1981: Energy production and climatic change: an Assessment. Proc. Sixth Internat. Symp., Uranium Institute, London, Sept., 1981.
- WMO-UNEP, 1988: Developing policies to respond to climatic change, WMO/TD-N 225.