



CAMBIO CLIMÁTICO Y ESTADÍSTICA OFICIAL

Carlos Gay García^[1], Francisco Estrada Porrúa^[2]
y Benjamín Martínez López^[3]

Este trabajo presenta un resumen sobre el cambio climático global y sus manifestaciones en México: modificaciones observadas en temperatura, precipitación y nivel del mar, así como algunas de las que se esperan durante este siglo y algunas estimaciones de sus impactos potenciales en la economía del país. Asimismo, se resalta que la escasez y falta de calidad en los registros de datos climáticos para nuestro país es un factor que limita la generación de información necesaria para orientar la toma de decisiones sobre cambio climático.

Palabras clave: cambio climático, clima.

This work presents a summary of global climate change and its impacts in Mexico: changes in temperature, precipitation and sea level, as well as some of the changes that are expected to occur during this century and some estimates of its potential impacts on Mexico's economy. This work also underlines that the scarcity and the poor quality of climate records in our country is a limiting factor for generating the information needed to assist decision-making regarding climate change.

Key words: climate change, climate.

[1] Doctor en Astrogeofísica, miembro del SNI, Investigador del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, de donde fue director. Es pionero en el desarrollo de estudios sobre cambio climático en México; Coordinador del capítulo sobre América Latina del Cuarto reporte de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático; representante oficial del gobierno mexicano ante el Panel Intergubernamental de Cambio Climático y la Conferencia de las Partes de la Convención Marco sobre Cambio Climático (cgay@servidor.unam.mx).

[2] Maestro en Administración de Riesgos. Es técnico académico en el Grupo de Cambio Climático y Radiación Solar del CCA de la UNAM. Su investigación se centra en la modelación y simulación de los impactos del cambio climático, la modelación estadística de series de tiempo climáticas y la incertidumbre (feporrúa@atmosfera.unam.mx).

[3] Doctor en Ciencias Naturales por la Universidad de Hamburgo (en Alemania) con especialización en Meteorología Aplicada, posdoctorado en el Instituto Tecnológico de Massachusetts licenciado y maestro en Oceanografía Física. Es investigador en el Grupo de Cambio Climático y Radiación Solar del CCA de la UNAM (benmar@atmosfera.unam.mx).

Calentamiento del planeta

De acuerdo con el *Cuarto reporte de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático* —denominado AR4, por sus siglas en inglés— (Meehl *et al.*, 2007), el calentamiento del planeta es un fenómeno *inequívoco*; las actividades humanas han contribuido de forma notable a su generación y ya hay efectos irreversibles en los sistemas naturales. Este calentamiento se refleja en un incremento de la temperatura promedio del planeta de alrededor de 1° C respecto a los valores observados en 1850.

Los océanos del planeta son un reservorio natural de bióxido de carbono (CO₂), el cual se encuentra de manera natural en nuestra atmósfera que, junto con otros *gases de efecto invernadero* (GEI), son los responsables de que la temperatura media de la Tierra sea aproximadamente de 15° C y no los -18° C que tendría en ausencia de dichos gases.

Desde la Revolución Industrial, la quema indiscriminada de combustibles fósiles ha cambiado la composición de la atmósfera. En particular, se ha incrementado la concentración de CO₂, la cual estuvo variando en un rango aproximado de 200 a 300 partes por millón en volumen (ppmv) durante los últimos 600 mil años, pero ahora está cercana a 400 ppmv. Existe 90% de confianza de que el calentamiento global del siglo XX se debe al aumento de las concentraciones de GEI derivados de las actividades humanas (Meehl *et al.*, 2007). Existen, sin embargo, mecanismos de interacción océano-atmósfera que no fueron considerados en el AR4, los cuales podrían ocasionar un calentamiento aún mayor en el corto y mediano plazo.

Uno de ellos es la liberación natural de CO₂ en los mares del sur que rodean la Antártida debido a un cambio de los patrones de viento, lo cual podría ya haber sucedido al finalizar la última glaciación y se podría repetir de proseguir el calentamiento antropogénico. En esta área geográfica se da la

mayor transferencia de energía de la atmósfera al océano y, como no existe una barrera natural, las corrientes marinas que circundan la Antártida son muy intensas. En general, la zona de vientos máximos no está alineada con las corrientes marinas máximas, pero eso se ha ido modificando de manera paulatina en los últimos 25 años y la asimetría se ha reducido. En caso de que se llegaran a empalmar los núcleos de los vientos y las corrientes, se incrementaría la magnitud de las últimas, originando a lo largo de la costa un transporte neto de agua hacia mar abierto y, en consecuencia, un afloramiento de aguas profundas (ricas en CO₂) en las regiones costeras de la Antártida: una fuente extra de CO₂, cuyo impacto es actualmente impredecible.

¿Qué muestran las observaciones recientes?

En agosto del 2009 se publicó en los principales diarios de nuestro país que los océanos registraron temperaturas récord: "El cambio climático ocasionó un promedio mundial en julio de 17° C, la más elevada desde que empezaron a tomarse las mediciones en 1880..." (AP, *El Universal*, jueves 20 de agosto de 2009), una noticia nada buena para la comunidad científica mundial preocupada por las consecuencias de tales incrementos y, aún peor, para los llamados *escépticos*, quienes cuestionan la validez de los reportes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés).

Y una noticia todavía peor es la evidencia contundente de una pérdida acelerada de hielo en la Antártida, determinada con mediciones satelitales de gravedad, publicada en la prestigiada revista *Nature Geoscience* en noviembre del 2009. De proseguir ese derretimiento, las proyecciones de incremento de nivel medio del mar del AR4, del orden de decenas de centímetros, se verían muy rebasadas.

Si nos preguntamos: ¿se está calentando el planeta?, la respuesta es afirmativa, fuera de toda duda. Si el cuestionamiento es: ¿podemos estimar de forma correcta los efectos de este calentamiento global en nuestro país?, la respuesta se complica.

Algunos cambios observados en México

La temperatura, la precipitación y el nivel medio de mar son tres variables muy importantes que se han registrado de manera más o menos regular en nuestro país. Las series, sin embargo, distan mucho de ser las óptimas para realizar los estudios pertinentes tendientes a estimar de forma confiable lo ocurrido en México durante el siglo XX. Es lo que se tiene, pero se puede aspirar a mejorarlo y es aquí donde se requiere la participación activa del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y otras instancias federales para que, junto con la Academia, se realice un diagnóstico crítico de la situación actual y se tomen las medidas pertinentes para corregir el rumbo y empezar a tener buenas bases de datos. A continuación, mencionamos algunos ejemplos de la información con la que se cuenta.

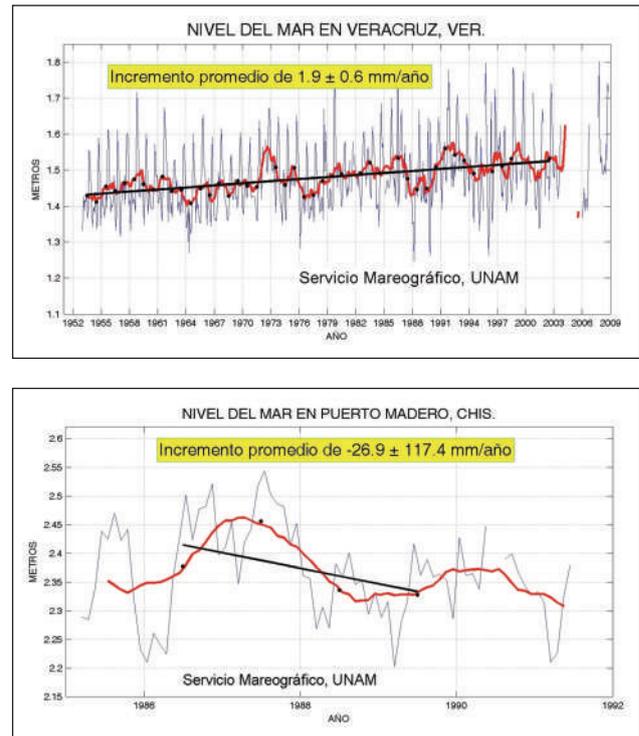
Nivel medio del mar

En la figura 1 se ilustra el problema fundamental —algunas veces frustrante— con el que nos enfrentamos cada día al tratar de determinar si algo está cambiando. En el panel superior se muestra una serie de datos de nivel del mar lo suficientemente larga como para estimar la tendencia observada de una manera confiable; por el contrario, en el panel inferior se encuentra una serie muy corta por lo cual no es posible estimar la tendencia observada de una manera confiable.

Precipitación

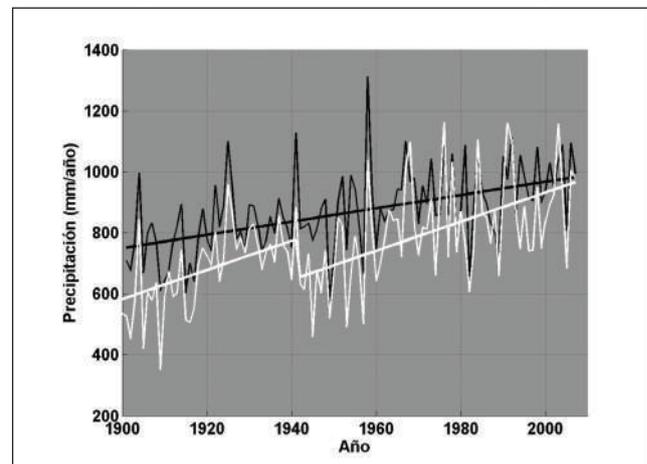
Para este tema se encuentran disponibles varias bases de datos con cobertura global; por ejemplo, la base del Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), que cubre el periodo 1901-2007 (Schneider *et al.*, 2008). En México no se cuenta con un producto semejante, ni siquiera cubriendo el territorio nacional. La carencia de información es crítica, lo cual se traduce en series incompletas (huecos y series truncas), bajísima calidad y la no disponibilidad de metadatos para homogeneizar. Una excepción es la serie del Observatorio de Tacubaya, que muestra un incremento sostenido de la precipitación anual durante el siglo XX (ver figura 2).

Figura 1
Datos disponibles del nivel del mar en el Puerto de Veracruz (panel superior) y en Puerto Madero, Chiapas (panel inferior)



Fuente: figuras cortesía del doctor Jorge Zavala Hidalgo.

Figura 2
Precipitación anual acumulada en Tacubaya (línea blanca) y el punto correspondiente de la base GPCC (P2, línea negra)



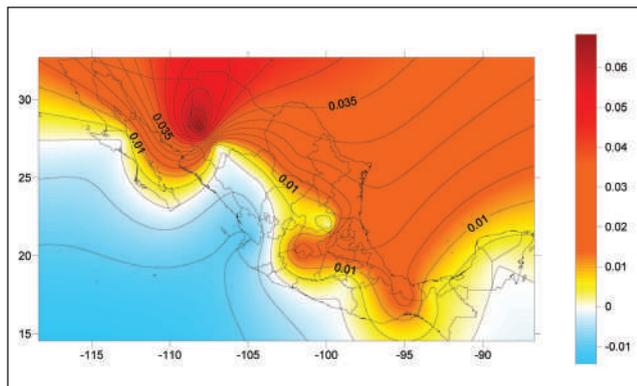
Nota: las tendencias son indicadas por las líneas gruesas. Las pendientes de las dos series y el cambio estructural ocurrido en 1942 son significativos.

Temperatura

En general, los datos disponibles muestran que una gran extensión de nuestro país se está calentando, siendo mayor en el noroeste de México (ver figura 3).

Figura 3

Tendencias de la temperatura anual en México, 1948-2004



Nota: unidades expresadas en grados centígrados por año.

Existen, sin embargo, pequeñas porciones del territorio nacional en las regiones costeras del Pacífico que se están enfriando de forma ligera y otras pocas que tienen un comportamiento neutro. El conocer con un alto grado de confiabilidad la historia del clima pasado de nuestro país es muy importante para entender lo que sucede en la actualidad y poder estimar de manera adecuada escenarios futuros del clima.

¿Cómo se estima el clima futuro?

Los modelos los empleamos, básicamente, con dos propósitos:

- Para reducir sistemas muy complejos.
- Como sustitutos de la realidad.

El primero nos sirve para entender y generar conocimiento, mientras que el segundo implica simular, con tanto realismo como podamos, a los fenómenos de interés. Los modelos acoplados de circulación general océano-atmósfera pertenecen a esta segunda categoría y constituyen la herramienta más poderosa con la que se cuenta para estimar la respuesta del sistema climático al incremento de los GEI. En nuestro país no tenemos la capacidad de desarrollar un modelo propio con tales características y todos los estudios realizados hasta la fecha se han basado en modelos simples del sistema climático o en la utilización de las salidas disponibles de los utilizados en el AR4.

Reducción de escala

Las celdas de los modelos usados para estimar el cambio climático tienen resoluciones espaciales, en el mejor de los casos, del orden de los 120 km, la cual no resuelve las características regionales de nuestro país y es necesario recurrir a los llamados métodos de reducción de escala, de los que existen estadísticos, dinámicos y mixtos.

En el caso de México, los métodos empleados para reducción de escala han sido, sobre todo, estadísticos; han mostrado ser mucho más baratos en tiempo de cómputo y tener un desempeño competitivo en relación con los dinámicos. Sin embargo, en la mayoría de los casos, su aplicación ha sido deficiente ya que se ha olvidado que el método implica proponer un modelo probabilístico y, por lo tanto, para que las estimaciones e inferencias sean válidas, es necesario que se satisfagan sus supuestos. Estrada *et al.* muestra que, dadas las características de series de tiempo de las variables climáticas, al aplicar métodos de reducción de escala utilizando herramientas automáticas se presenta el fenómeno de regresión espuria en más de 90% de los casos. En esta circunstancia, los patrones espaciales y las magnitudes que se obtengan son arbitrarias y reemplazan la física incluida en los escenarios producidos por los modelos de circulación general.

Manejo de incertidumbre

El uso eficiente de recursos económicos para enfrentar el cambio climático en términos de adaptación, mitigación e impactos (remediación y prevención) depende de la cantidad, calidad e interpretación de la información (e incertidumbre) disponible (Gay y Estrada, 2010).

Gran parte de la relevancia de la ciencia desarrollada alrededor del cambio climático está en función de su utilidad para la toma de decisiones. Como se menciona en Schneider (2003), aunque en los últimos años se han logrado avances importantes en la modelación del clima, es necesario integrar la incertidumbre en el proceso de toma de decisiones y desarrollo de políticas. Sin embargo, para esto último, es necesaria la estimación de probabilidades de los distintos escenarios que se construyan. Desafortunadamente, debido a la falta de metodologías adecuadas para el manejo de incertidumbre, una parte importante de la información que se está generando no está siendo

aprovechada de forma adecuada para la estimación del riesgo ni para la toma de decisiones (Estrada *et al.*, 2008).

Por último, es importante distinguir entre dos tipos de incertidumbre: aleatoria y epistémica. La primera se refiere a los casos en los que las probabilidades se pueden establecer mediante la observación y repetición de experimentos aleatorios y la segunda, a los casos en los que el resultado de un experimento es incierto porque existe conocimiento limitado, información incompleta o falta de comprensión.

A pesar de que es claro que la incertidumbre en cambio climático es de tipo epistémica, la mayoría de los métodos actuales están basados en un enfoque *frecuentista* que no es capaz de proveer estimaciones razonables de las probabilidades y, mucho menos, permiten alcanzar el *enfoque de manejo de riesgo* que se pretende.

Como se menciona en Gay y Estrada (2010) y Estrada (2008) es importante recordar que las frecuencias y las probabilidades guardan una estrecha relación pero que, sin embargo, son conceptos distintos. Desde la perspectiva *frecuentista*, la probabilidad *objetiva* de un evento, que sea empíricamente medible mediante la observación de un experimento aleatorio, puede aproximarse por frecuencias relativas cuando el número de repeticiones tiende al infinito.

Las predicciones obtenidas al asignar una distribución de probabilidades en esta forma son, en principio, verificables y si las probabilidades fueron asignadas correctamente deben representar de manera adecuada las variaciones de la variable aleatoria de interés (ver Jaynes, 1957). Por lo tanto, la asignación de probabilidades por medio de frecuencias relativas a los distintos escenarios de cambio climático presentan los siguientes inconvenientes:

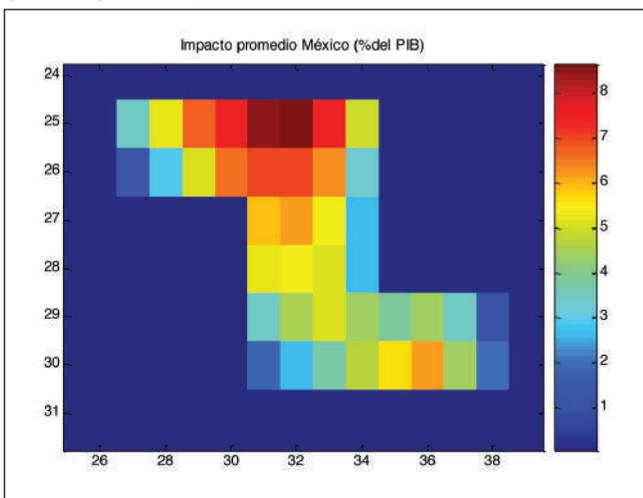
- El evento en estudio no es observable y no puede ser medido de forma empírica (ver Kinzing *et al.*, 2003).
- El conjunto de salidas de los modelos no se puede considerar como generada mediante un experimento aleatorio ya que, entre otras cosas, implicaría la realización de un cierto número de repeticiones bajo las mismas condiciones, el uso de diferentes escenarios de emisiones (y/o modelos) no lo permite.

- Sólo existe un número pequeño disponible de salidas de modelos de circulación general con el cual se pretende estimar probabilidades mediante frecuencias relativas. En este sentido, es conveniente recordar que, por ejemplo, cuando se quiere aproximar la distribución de una variable no muy sencilla mediante métodos de Monte Carlo, por lo general se requieren varios miles de realizaciones. Más aún, cuando se revisan con cuidado las gráficas de emisiones y temperaturas futuras mostradas en el *Tercer reporte de evaluación* del IPCC (2001), se puede observar que los escenarios tienden a formar *clusters* y producen *agujeros* para algunos rangos de valores. Usando el enfoque *frecuentista*, estos agujeros implican probabilidad 0 para algunos intervalos y, claramente, no existe ninguna razón física para que eso ocurra. ¿Es imposible que haya un aumento de entre, supongamos, 4.5 y 5.8° C pero sí de 4 ó 6° C? Es evidente que esto es el producto de un problema de muestreo. Este problema no es trivial y podría generar sesgos importantes en la distribución que se pretende aproximar por frecuencias relativas.
- No se puede verificar el ajuste de la distribución de probabilidades ya que no existen observaciones para, por ejemplo, el 2100.
- Los escenarios de cambio climático pueden tender a agruparse alrededor de un valor particular debido a que están basados en la misma información y a que los modelos que los produjeron comparten las mismas estrategias de modelación y no porque ese valor en particular sea más probable. De alguna manera, es similar a pensar de que el hecho de que una noticia aparezca en dos medios distintos, que comparten la misma fuente, la haga más creíble (Allen, 2003).

Impactos de cambio climático en la economía

La estimación de los impactos potenciales de cambio climático en la economía ha sido, desde hace décadas, un tema de constante investigación y debate. Una de las principales motivaciones de tales estudios es promover la toma eficiente de decisiones sobre la conveniencia de aplicar políticas de mitigación y adaptación.

Figura 4
Impacto promedio del cambio climático para México (como porcentaje del PIB) en el 2100



Nota: la resolución espacial del modelo es de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$.

Uno de los estudios más importantes en el tema es el *Reporte Stern*, en el cual se estima que los impactos potenciales de cambio climático representarán pérdidas en el producto interno bruto (PIB) mundial de entre 5 y 20% anual todos los años, desde ahora y para siempre.

Para el caso de México, en el documento *La economía del cambio climático en México* (SEMARNAT-SHCP, 2009) se estima que los impactos de cambio climático acumulados desde ahora hasta el 2100 representarían tan sólo alrededor de 7.68% del PIB actual del país. Las estimaciones obtenidas utilizando el modelo de evaluación integrada del Centro de Ciencias de la Atmósfera muestran que los impactos potenciales de cambio climático para México acumulados hasta el 2100 podrían ser considerablemente mayores, representando alrededor de 20 veces el PIB actual de México (ver figura 4). ■

Referencias

- Allen M. R. (2003). Possible or probable? *Nature*, 425:242.
- Estrada, F., V. M. Guerrero y C. Gay. A Cautionary Note on Statistical Downscaling Methods for Climate Change. Enviado a *Climatic Change*.
- Estrada F., C. Gay y C. Conde (2008). *Un nuevo enfoque para la construcción de escenarios probabilísticos de cambio climático*. VI Congreso de la Asociación Española de Climatología.

Gay C. y F. Estrada (2010). Objective probabilities about future climate are a matter of opinion. *Climatic Change*, 99 (1-2) 27-46.

IPCC (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report 2001. Contribution of Working Group I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (R. T. Watson and the Core Writing Team eds.). Cambridge, Cambridge University Press, 397 pp.

Jaynes, E. T. (1957). Information theory and statistical mechanics. *Phys Rev.* 106(4):620-630.

Kinzig, A., D. Starrett, K. Arrow, S. Aniyar, B. Bolin, P. Dasgupta, P. Ehrlich, C. Folke, M. Hanemann, G. Heal, M. Hoel, A. M. Jansson, B-O. Jansson, N. Kautsky, S. Levin, J. Lubchenco, K-G. Mäler, S. W. Pacala, S. H. Schneider, D. Siniscalco, B. Walker (2003). Coping with uncertainty: a call for a new science-policy forum. *Ambio*, 32: 330-335.

Meehl, G. A., T. F. Stocker, W. D. Collins, P. Friedlingstein, A. T. Gaye, J. M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J. M. Murphy, A. Noda, S. C. B. Raper, I. G. Watterson, A. J. Weaver, Z-C. Zhao (2007). Global climate projections, in: Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller (eds.). *Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press.

Schneider, S. H. (2003). Imaginable surprise, in: Potter T. D. y B. Colman (eds.). *Handbook of weather, climate and water: atmospheric chemistry, hydrology, and societal impacts*. New York, Wiley.

Schneider, U., A. Fuchs, A. Meyer-Christoffer y B. Rudolf (2008). *Global Precipitation Analysis Products of the GPCC*. Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), DWD, Internet publication, 1-12. www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU4/KU42/Publikationen/GPCC_intro_products_2008,temp/ateld=raw,property=publicationFile.pdf/GPCC_intro_products_2008.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Secretaría de Hacienda y Crédito Público (2009). *La economía del cambio climático en México*. México, DF, SEMARNAT-SHCP.