Banco Interamericano de Desarrollo

Unidad de Energía Sostenible y Cambio Climático,
Departamento de Infraestructura y Medio Ambiente

NOTAS TÉCNICAS
IDB-TN-145

La ciencia del cambio climático

Manual práctico para tomadores de decisiones en Mesoamérica

Versión original en inglés
Robert Oglesby
Clinton Rowe

Versión revisada en español
Alfred Grünwaldt
Sandra Valencia
Inês Ferreira

Septiembre 2010

La ciencia del cambio climático

Manual práctico para tomadores de decisiones en Mesoamérica

Versión original en inglés
Robert Oglesby
Clinton Rowe

Versión revisada en español
Alfred Grünwaldt
Sandra Valencia
Inês Ferreira

Banco Interamericano de Desarrollo

2010

© Banco Interamericano de Desarrollo, 2010
www.iadb.org

Las “Notas técnicas” abarcan una amplia gama de prácticas óptimas, evaluaciones de proyectos, lecciones aprendidas, estudios de caso, notas metodológicas y otros documentos de carácter técnico, que no son documentos oficiales del Banco. La información y las opiniones que se presentan en estas publicaciones son exclusivamente de los autores y no expresan ni implican el aval del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representan.

Este documento puede reproducirse libremente a condición de que se indique que es una publicación del Banco Interamericano de Desarrollo.

1300 New York Avenue, N.W
Washington, D.C. 20577
Estados Unidos

www.iadb.org/secci; Maria Netto (mnetto@iadb.org); Alfred Grünwaldt (alfredg@iadb.org)

Índice

Agradecimientos **2**
Prefacio **3**
Abreviaciones **5**
Conceptos básicos **6**
Introducción **8**
Clima y cambio climático **9**
La ciencia básica del cambio climático 10
Escenarios de cambio climático 11
Modelización del cambio climático **13**
¿Por qué necesitamos contar con modelos climáticos? 13
¿Qué es un modelo climático? 13
El Modelo de Circulación General (MCG) 15
El Modelo Climático Regional (MCR) 16
Verificación e incertidumbre de los modelos **18**
Cuestiones que se plantean en la cuantificación de la incertidumbre 20
Construcción y evaluación de probabilidades 21
Vulnerabilidad y evaluación de los impactos **22**
Evaluaciones de la vulnerabilidad, e impactos regionales 22
Estrategias para hacer frente a las principales vulnerabilidades 24
La incertidumbre en la evaluación de las estrategias de respuesta 24
Agentes de cambio que compiten entre sí 25
Implicaciones del cambio climático para la región mesoamericana 25
Resultados del modelo regional 27
Resumen y pasos futuros **32**

Gráficos

1. Representación esquemática de los componentes del sistema climático, sus procesos e interacciones 11
2. Emisión mundial total de CO_2 12
3. Aumento de la resolución sobre la geografía terrestre y oceánica de los modelos 17
4. Comparación entre las anomalías del promedio mundial de la temperatura de superficie y las simulaciones MCGAO 19
5. Series cronológicas de la temperatura 21
6. Cambios de temperatura y precipitación en América Central y América del Sur 27
7. Temperaturas medias, México y Colombia 28
8. Temperaturas medias, México 30
9. Temperaturas medias, Colombia 30
10. Precipitación total, México y Colombia 31
11. Precipitación total, México 32
12. Precipitación total, Colombia 32

Agradecimientos

Esta Nota Técnica fue preparada para el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) por Robert Oglesby y Clinton Rowe, bajo la coordinación de Alfred Grünwaldt, Especialista en Cambio Climático de la Unidad de Energía Sostenible y Cambio Climático del BID (INE/ECC) y la supervisión de Juan Pablo Bonilla, Jefe de INE/ECC. Revisiones y comentarios fueron recibidos de Inês Ferreira y Sandra Valencia, Consultoras en Cambio Climático de INE/ECC.

Los autores expresan su gratitud a Eva Vilarrubí por su ayuda en la edición del documento.

Nota sobre los autores

Robert Oglesby es profesor de Modelización Climática en el Departamento de Geociencias y la Facultad de Recursos Naturales de la Universidad de Nebraska - Lincoln. Con anterioridad ocupó los cargos de investigador principal en la NASA y profesor asociado en Ciencias Atmosféricas en la Universidad de Purdue. Cuenta con más de 20 años de experiencia en el uso de modelos mundiales y regionales en la investigación de cuestiones relacionadas con el clima pasado, presente y futuro.

Clinton Rowe es profesor del Programa de Meteorología y Climatología en el Departamento de Geociencias de la Universidad de Nebraska - Lincoln. Tiene más de 20 años de experiencia en la elaboración de modelos sobre las interacciones entre la superficie terrestre y la atmósfera empleados para estudiar el impacto de dichas interacciones sobre el sistema climático a diferentes escalas.

Prefacio

En una asociación que abarca más de cinco décadas, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y sus países miembros en América Latina y el Caribe han invertido fuertemente en el desarrollo económico y social. Los resultados han sido sustanciales, entre ellos, mejores niveles de vida, reducción de la pobreza, mejor infraestructura, y fortalecimiento institucional, sin embargo el cambio climático amenaza estos avances.

El cambio climático es cada vez más reconocido como un gran desafío y representa a mediano y largo plazo, una de las mayores amenazas para el desarrollo y bien estar humano. No es posible predecir exactamente lo que pasaría en los distintas localidades, pero las tendencias analizadas apuntan a cambios en los patrones de lluvias y temperaturas, un posible aumento del nivel del mar, reducción de la biodiversidad, derretimiento de glaciares y mayor frecuencia en la ocurrencia de eventos extremos tales como huracanes, sequías, y fuegos forestales.

Los países en desarrollo y en especial aquellos más pobres, serán los más afectados por los efectos del cambio climático a la vez que luchan por superar la pobreza y promover el crecimiento económico. Es así que, el cambio climático amenaza con profundizar la vulnerabilidad actual y atenta gravemente contra las perspectivas de desarrollo y el cumplimiento de las Metas de Desarrollo del Milenio (MDG, por sus siglas en inglés). La pérdida de viviendas, la reducción de la productividad agrícola y pérdidas de cosechas, el aumento del hambre, la malnutrición y las enfermedades son apenas algunos de los efectos previsibles. Por esta razón se vuelve imperativo que los países en desarrollo logren incorporar efectivamente dentro de sus planes de desarrollo actividades replicables que logren reducir vulnerabilidad actual y futura a los efectos observados y anticipados de variabilidad y cambio climático. La adaptación al cambio climático se debe convertir para la región de Latinoamérica y el Caribe como un punto central en la agenda de desarrollo socio-económico y procesos de toma de decisión.

Los modelos del sistema climático han demostrado ser una herramienta muy útil para lograr entender mejor los efectos anticipados del cambio climático sobre sistemas vulnerables y constituyen un valioso aporte al proceso de planificación y formulación de políticas.

Con el apoyo del BID, los países de América Latina y el Caribe vienen diseñando estrategias de adaptación que toman en cuenta información obtenida de distintos escenarios de

cambio climático generados por estos modelos e introduciendo nuevas tecnologías para reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

El BID viene respondiendo a la creciente demanda proveniente de los países de la región en la ampliación del conocimiento práctico referente a la implementación de medidas de adaptación y estrategias encaminadas a reducir la vulnerabilidad frente al cambio climático en el contexto del desarrollo sostenible. Esto se ha logrado mediante programas de apoyo a los países, en los que se han incluido el diseño y ejecución de medidas demostrativas y replicables de adaptación, elaboración de estrategias de cambio climático a niveles nacional y sub-nacional, como también componentes de capacitación dirigidos a los responsables de diseñar políticas en la región y grupos científicos de investigación, además del apoyo al fortalecimiento de instituciones con responsabilidades en este ámbito.

Alexandre Meira da Rosa
Gerente
Sector de Infraestructura y Medio Ambiente

Abreviaciones

˚C	Grados Celsius
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
DJF	Diciembre, Enero y Febrero
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IE-EE	Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones
INE/ECC	Unidad de Energía Sostenible y Cambio Climático
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
JJA	Junio, Julio y Agosto
km	Kilómetro
mm	Milímetro
MCG	Modelo de Circulación Global
MCGA	Modelo de Circulación Global Atmosférico
MCGAO	Modelo de Circulación Global Atmosférico y Oceánico
MCGO	Modelo de Circulación Global Oceánico
MCR	Modelo Climático Regional
MDG	Metas de Desarrollo del Milenio
MMD	Conjunto de Datos Multimodelo
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
WG-I	Grupo de Trabajo I
WRF	Investigación y Previsión Meteorológica

Conceptos básicos

El último Informe de Evaluación (AR4) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) presenta una recopilación muy importante de información científica relacionada con cambios observados y anticipados en el sistema climático. Para poder hacer un mejor uso de esta información, es fundamental contar con la definición de algunos conceptos básicos a los que se hará referencia a lo largo de este documento. A continuación se presentan los más importantes.

El ***tiempo*** es el estado fluctuante de la atmósfera que nos rodea, en tanto que el ***clima*** es la descripción estadística del ***tiempo***. La variabilidad a escalas de tiempo de entre algunos años y algunas décadas suele denominarse ***variabilidad climática***. Cuando la escala de la variabilidad es de más de algunas décadas suele emplearse el término ***cambio climático***.

Los ***Gases de Efecto Invernadero*** (GEI) son un fenómeno natural y las concentraciones preindustriales son el motivo por el cual la temperatura promedio de la tierra se mantiene casi 30 grados centígrados por encima del nivel que tendría en ausencia de estos gases (es decir, el ***efecto invernadero natural***). Concentraciones más altas de gases de efecto invernadero atribuibles a actividades humanas se traducen en temperaturas incluso más altas. Es este ***efecto invernadero ampliado*** el que nos alarma hoy en día. Las proyecciones sobre la futura emisión de gases de efecto invernadero o ***escenarios***, se basan en supuestos con respecto al desarrollo económico, el crecimiento demográfico, el desarrollo de energía alternativa y el cambio tecnológico. Ningún ***escenario*** particular en materia de emisiones es el "correcto", o tiene más probabilidades de materializarse que los otros.

Los cambios en la cantidad atmosférica de ***gases de efecto invernadero*** y aerosoles, como también en radiación solar y propiedades de la superficie terrestre, alteran el balance energético del sistema climático. Estos cambios se expresan normalmente en términos de ***forzamientos radiactivos,*** los cuales son usados para comparar cómo un rango específico de factores naturales y humanos influye en el calentamiento o enfriamiento del clima global. Específicamente, de acuerdo al informe del IPCC, el término ***forzamiento radiactivo*** es una medida de la influencia que un factor tiene sobre la alteración del balance existente entre la energía entrante y saliente del sistema Tierra-Atmósfera y constituye un índice de la importancia de dicho factor como un mecanismo potencial de cambio climático.

Los modelos meteorológicos y climáticos se utilizan para pronosticar el tiempo a corto plazo y estudiar de qué forma reacciona el sistema climático a distintos cambios, o ***forzamientos.*** Los modelos climáticos mundiales no pueden reproducir el calentamiento observado recientemente sin incluir forzamientos antropogénicos (sobre todo, emisiones de gases de efecto invernadero).

Dada la creciente certidumbre de que se está produciendo un cambio climático inducido por el hombre, el IPCC subraya que la atención se está centrando menos en estudiar los fundamentos de la ciencia climática mundial y más en comprender mejor el cambio climático y en hacer frente a sus impactos. Los resultados a escala mundial son útiles para describir las características generales y las tendencias a gran escala del cambio climático, pero no son muy robustos a escala local o regional (generalmente entre 10 km y 20 km), para lo que se requieren ***modelos climáticos regionales***. El método mediante el cual dichos modelos a escala mundial son regionalizados se conoce como "***downscaling***".

Un ***impacto*** atribuible al cambio climático significa *un cambio específico que se produce en un sistema por exposición al cambio climático.* Una ***vulnerabilidad*** significa el grado en que un sistema natural o humano es susceptible a los efectos negativos de un ***impacto*** atribuible al cambio climático o incapaz de afrontarlos. La evaluación de las principales vulnerabilidades se caracteriza por una considerable *incertidumbre científica* y presupone *juicios de valor*. Un punto clave a tener en cuenta para Mesoamérica: *¡Las regiones menos desarrolladas de baja latitud son probablemente las que corran el mayor riesgo!* Esto *no significa* que los cambios climáticos sean más pronunciados en zonas de baja latitud; de hecho, tanto las observaciones como los modelos indican que los mayores cambios ocurrirán en las *zonas de alta latitud*. Son las características de sus sistemas humanos las que exponen esta región a un riesgo mayor.

Por último, el calentamiento mundial provocado por el aumento de la emisión de gases de efecto invernadero no es, de ninguna manera, el único agente importante del cambio climático. Factores como el cambio en el uso del suelo también pueden ser importantes a nivel local. En el caso particular de América Latina, este constituye una de las principales fuentes de emisión de GEI.

Introducción

La región mesoamericana (el conjunto de países que se extiende de México a Colombia) ya está sufriendo los efectos del cambio climático. Debido a su limitada capacidad de adaptación, en gran medida producto de su contexto socioeconómico, la región es muy vulnerable a dicho cambio. Por lo tanto, reviste importancia primordial ayudar a respaldar a estos países en sus esfuerzos por comprender y hacer frente a los efectos del cambio climático, mediante la adaptación y la mitigación. Una forma de contribuir a estos esfuerzos es proporcionar a la región herramientas adecuadas para evaluar los impactos previstos del cambio climático y su vulnerabilidad frente a estos. En la actualidad, la información que proporcionan los modelos avanzados de cambio climático de alta resolución es un valioso aporte al proceso de planificación y formulación de políticas. Sin embargo, los resultados de los modelos climáticos no siempre están disponibles en un formato práctico o fácil de comprender para los responsables de tomar decisiones, que deben hacer frente al impacto del cambio climático, pero que no están necesariamente familiarizados con la ciencia en que se sustentan los modelos o con la interpretación de sus resultados. La meta del presente informe es abordar estas dificultades.

Este informe comienza con una exposición básica sobre el clima en la que se define, de la forma más precisa posible, lo que entendemos por el estado del tiempo, el clima, la variabilidad climática y el cambio climático. Se examinan los mecanismos a través de los cuales el aumento de los gases de efecto invernadero puede ocasionar cambio climático. Más adelante, se describen los modelos climáticos y las razones por las cuales son necesarios, para luego abordar por qué se requiere contar con modelos climáticos mundiales y regionales para elaborar hipótesis adecuadas sobre el cambio climático. Posteriormente, la atención se centra en la utilización de los resultados del modelo para evaluar los impactos y las vulnerabilidades probables. El análisis incluye la verificación de los modelos sobre la base de observaciones, la cuantificación de las probabilidades y la incertidumbre de los modelos, la identificación de las principales vulnerabilidades y posibilidades de adaptación y, por último, la formulación de estrategias de respuesta. El informe concluye con un resumen de los cambios climáticos que probablemente afectarán a Mesoamérica en las próximas décadas y las posibles consecuencias de esos cambios.

Clima y cambio climático

¿Qué significan los términos "tiempo", "clima", "variabilidad climática" y "cambio climático"?

El primer paso en el análisis de los temas que guardan relación con el cambio climático es definir, con la mayor precisión posible, lo que se entiende por "tiempo", "clima", "variabilidad climática" y "cambio climático". "Tiempo" y "clima" son términos diferentes y, con frecuencia, la distinción no se comprende. El **tiempo** se refiere a las fluctuaciones de la atmósfera que nos rodea, en tanto que clima es la descripción estadística del tiempo. Según el IPCC[1], la definición más formal es la siguiente:

> Se suele definir el clima, en sentido estricto, como el "promedio del estado del tiempo" o, más rigurosamente, como una descripción estadística en términos de valores medios y de variabilidad de las cantidades de interés durante un período que puede abarcar desde algunos meses hasta miles o millones de años. El período clásico es de 30 años, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Dichas cantidades son casi siempre variables de superficie, como la temperatura, las precipitaciones o el viento. En un sentido más amplio, el clima es el estado del sistema climático, incluida una descripción estadística de éste.

En términos más coloquiales, **"el clima es lo que se pronostica; el estado del tiempo, lo que ocurre".** La delimitación exacta entre "clima" y "tiempo" no está bien definida y depende de la aplicación del caso. El clima suele definirse en función de medias correspondientes a períodos de 30 años y, aunque se prevé que estos valores varíen de un año a otro, se supone que la magnitud de esas variaciones no cambia durante el período en el cual se promedia. Como se señaló anteriormente, cuando se emplea una escala temporal corta, estamos describiendo el tiempo, pero cuando la variabilidad se mide a escala de algunos años o algunos decenios (es decir, durante un período más corto que el clásico período de 30 años usado para los promedios) nos referimos generalmente a la ***variabilidad climática.*** Cuando la escala temporal de la

[1] El IPCC es un órgano científico creado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para estudiar y evaluar el cambio climático; pueden participar en él representantes de todos los países miembros de estos dos organismos (véase información adicional sobre la función y la misión del IPCC en http://www.ipcc.ch/organization/organization.htm).

variabilidad supera varios decenios (es más larga que el clásico período climático de referencia) nos estamos refiriendo generalmente al ***cambio climático.***

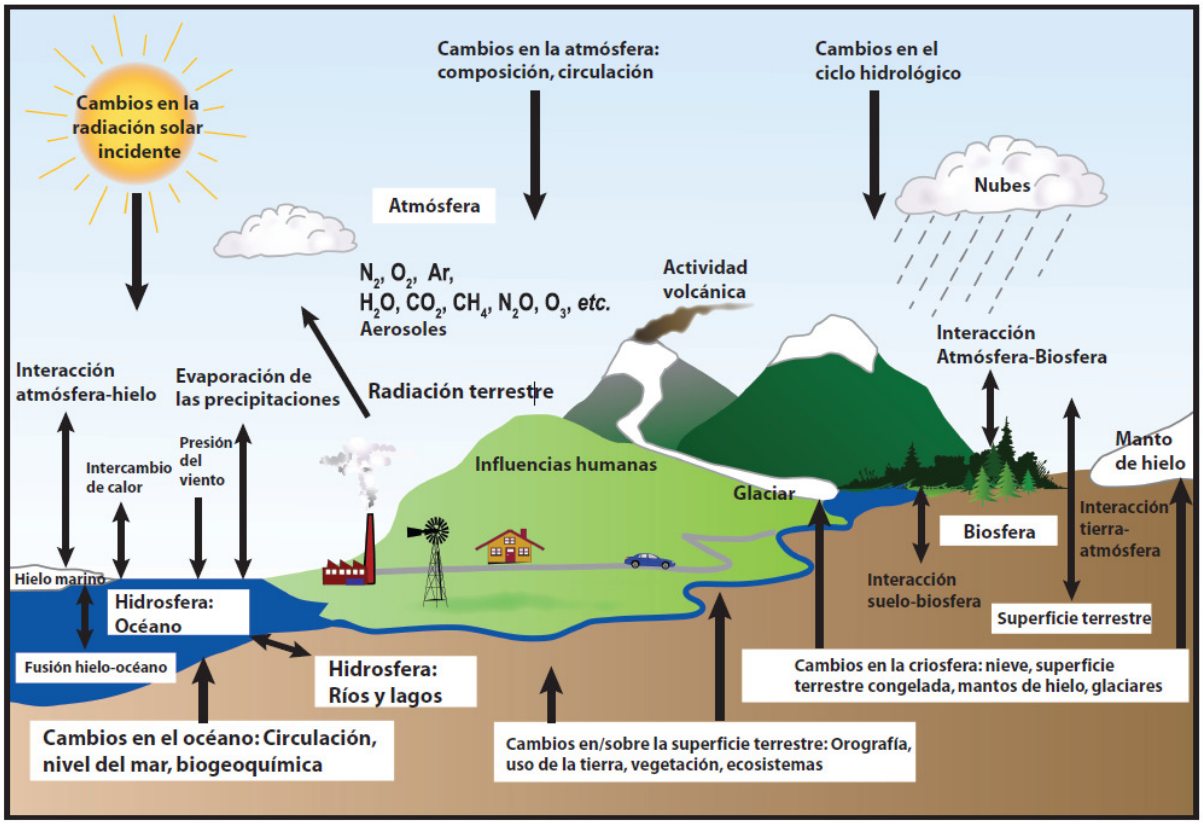
La ciencia básica del cambio climático

El sistema climático del planeta (gráfico 1) consta de cinco componentes principales: la ***atmósfera***, la ***hidrosfera*** (océanos, lagos, ríos, etc.), la ***criosfera*** (mantos de hielo, glaciares, hielo marino), la ***biosfera*** (vegetación y suelos) y la ***litosfera*** (volcanes, orografía, intemperización). Estos componentes interactúan a través de una serie de procesos físicos (principalmente intercambios de calor, materia y tensión entre los componentes) para producir el clima de la tierra. A través de estas interacciones, un cambio en cualquiera de estos componentes puede ocasionar cambios en otros. Los cambios en los componentes son consecuencia de cambios en los forzamientos, o factores externos, que pueden ser positivos (ocasionando calentamiento) o negativos (ocasionando enfriamiento). Los forzamientos del clima pueden clasificarse como naturales o antropogénicos (es decir, inducidos por el hombre). Los ejemplos de forzamientos naturales incluyen la variabilidad solar y las erupciones volcánicas; los forzamientos antropogénicos incluyen la emisión de GEI, la producción de aerosoles y los cambios en el uso del suelo. Asimismo, a través de una serie de efectos de retroacción, el cambio inicial puede incrementarse (retroacción positiva) o reducirse (retroacción negativa). Siempre ha habido cambios en los forzamientos naturales - continúan hoy en día - y han provocado cambios climáticos y variabilidad climática a lo largo de la historia del planeta; pero solo recientemente la magnitud de los forzamientos antropogénicos ha sido suficiente como para afectar considerablemente al sistema climático.

Casi toda la energía en que se sustenta el sistema climático proviene del sol, pero si bien la energía que este emite ha variado a lo largo del tiempo, ocasionando cambios climáticos durante la historia geológica de la tierra, las variaciones de la radiación solar no explican el calentamiento observado en los últimos 30 años en que la energía del sol ha sido cuantificada con precisión. Si se descarta el forzamiento solar, podría sostenerse que el forzamiento climático más importante se debe a cambios en la composición atmosférica, en particular, proveniente de los gases de efecto invernadero y de los aerosoles. Los GEI son un fenómeno natural y las concentraciones preindustriales son el motivo por el cual la temperatura promedio de la tierra se mantiene casi 30ºC por encima del nivel que tendría en ausencia de dichos gases (es decir, el

efecto invernadero natural). Si no hubiera retroacción alguna, no cabe duda de que una mayor concentración de GEI atribuible a actividades humanas se traduciría en temperaturas más altas. Este ***efecto invernadero ampliado*** es el que preocupa hoy en día. Si bien el efecto básico es calentamiento atmosférico, este, a su vez, da lugar a otros efectos, como cambios en los patrones de precipitación, deshielo de glaciares y de mantos de hielo, y elevación del nivel del mar.

Gráfico 1. Representación esquemática de los componentes del sistema climático, sus procesos e interacciones



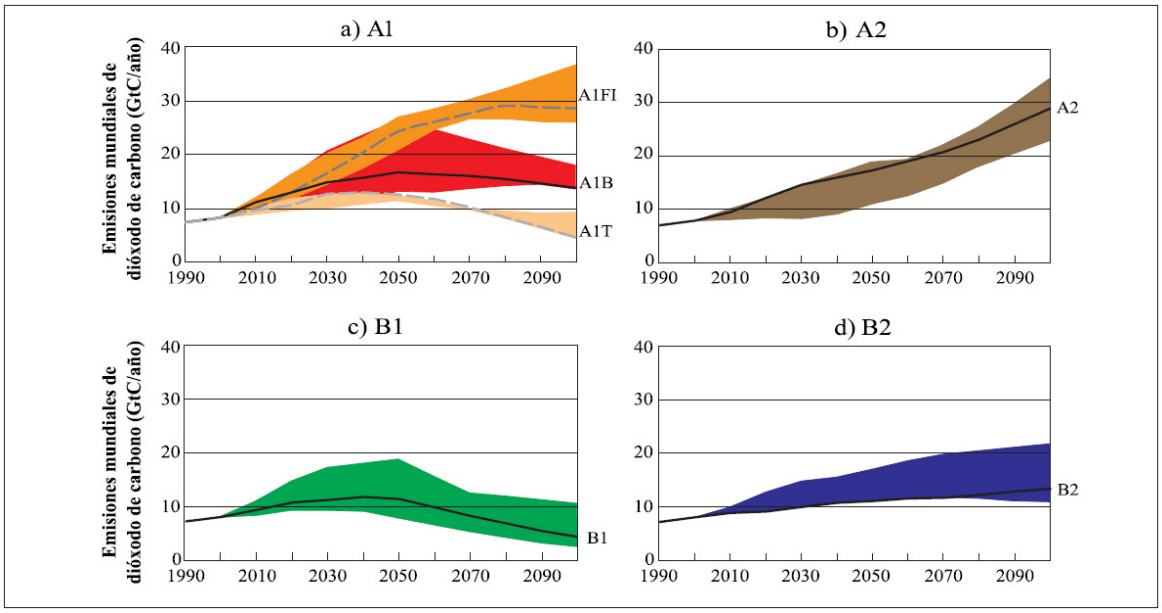
Fuente: Extraído de IPCC, AR4, WG-I, FAQ 1.2, gráfico 1.

Escenarios de cambio climático

Las proyecciones sobre las futuras emisiones de GEI se basan en supuestos relativos a desarrollo económico, crecimiento demográfico, desarrollo de energías alternativas y cambio tecnológico. Utilizando distintas combinaciones de supuestos, el IPCC ha elaborado más de 40 escenarios sobre las emisiones de GEI (gráfico 2), organizados en cuatro familias (A1, A2, B1 y B2). A su vez, la familia A1 se subdivide en tres grupos de escenarios (A1FI, A1B y A1T), en función de

supuestos acerca del uso de combustibles fósiles y de fuentes de energía alternativas. Cada uno de estos grupos contiene más de un escenario, y se seleccionó uno de cada grupo como "ilustrativo". Estos escenarios de emisiones permiten elaborar estimaciones sobre la futura concentración de GEI en la atmósfera y pueden utilizarse para elaborar proyecciones sobre el futuro cambio climático. El escenario que se escoja a efectos de la planificación depende del problema en cuestión y de los posibles impactos y vulnerabilidades previstas. En muchos casos, se examinan los escenarios de la familia 'A' (sobre todo, A2, el caso en que se mantiene el *status quo*) porque son los que darían lugar al mayor cambio climático y, por ende, al mayor nivel de tensión sobre los sistemas naturales y humanos. Considerar los escenarios que presuponen estabilizaciones débiles o fuertes (los casos de las familias "B"), en cambio, puede ser apropiado cuando se está investigando una gama de posibles necesidades y estrategias de adaptación. Es importante recordar que ningún escenario de emisiones es "correcto" o tiene siquiera mayor probabilidad de materializarse que cualquiera de los otros. De hecho, las decisiones de política que se están adoptando actualmente y las que se adoptarán en el futuro pueden influenciar fuertemente "mitigar" las emisiones de GEI que se producirán efectivamente en las próximas décadas.

Gráfico 2. Emisión mundial total de CO_2



Fuente: Extraído del Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IE-EE) del IPCC, gráfico 3.
Nota: Emisiónes mundiales totales de CO_2 provenientes de todas las fuentes (energía, industria y cambios en el uso del suelo) entre 1990 y 2100 (en giga toneladas de carbono por año: GtC/año) para las familias y los seis grupos de

escenarios. Los 40 escenarios del IE-EE están representados en función de las familias (A1, A2, B1 y B2) y de los seis grupos de escenarios: a) A1FI, de uso intensivo de combustibles de origen fósil (compuesto por los escenarios de alto uso de carbón y de alto uso de petróleo y gas), A1T, predominantemente combustibles de origen no fósil, el A1B equilibrado; b) A2; c) B1; y d) B2. Cada banda de emisión coloreada indica la gama de escenarios armonizados y no armonizados de cada grupo. Para cada uno de los seis grupos de escenarios se ofrece un caso ilustrativo, incluidos los cuatro escenarios ilustrativos de referencia (A1, A2, B1, B2, líneas sólidas) y dos escenarios ilustrativos correspondientes a A1FI y A1T (línea discontinua)**.**

Modelización del cambio climático

¿Por qué necesitamos contar con modelos climáticos?

En los últimos años y gracias al advenimiento de la era de supercomputadoras, el uso y aplicación práctica de modelos numéricos, tales como los modelos del clima, han permitido el mejor entendimiento de procesos en la naturaleza para los cuales habría sido muy complejo llevar a cabo ciertos experimentos. Los modelos del sistema climático surgen como una respuesta a la necesidad de poder representar y estudiar con más detalle ciertas interacciones del sistema atmósfera-océano-superficie terrestre en respuesta a posibles forzamientos específicos.

En la actualidad la humanidad está realizando un "experimento" de cambio climático al incrementar la concentración atmosférica de los gases de efecto invernadero y efectuar otros cambios en el sistema climático. Desafortunadamente, no se trata de un experimento controlado; es decir, solo se cuenta con un planeta con el que experimentar y no se puede saber cuál sería el clima sin los forzamientos antropogénicos que se le han aplicado al sistema. Tampoco se sabrá el resultado de este experimento hasta que no esté concluido y, llegado ese momento, todo cambio que haya ocurrido podría ser no solo de gran magnitud, sino también irreversible. Asimismo, la complejidad del sistema climático no permite una experimentación basada en pruebas de laboratorio.

Para abordar estos temas se emplean modelos matemáticos - calculados con computadoras de alto rendimiento - que permiten realizar numerosos experimentos numéricos sobre los probables efectos de los forzamientos antropogénicos.

¿Qué es un modelo climático?

Para poder simular el clima, es necesario calcular los efectos de todos los principales procesos que inciden en el *sistema climático*. Muchos de estos procesos se describen en el gráfico 1.

Aunque nuestros conocimientos de estos procesos puedan representarse en términos matemáticos, la complejidad del sistema significa que, en la práctica, estos efectos solo pueden calcularse con computadoras. Por lo tanto, la formulación matemática se realiza mediante un programa informático que se denomina *modelo climático*. También es importante tener en cuenta que estos modelos climáticos son muy similares a los que se emplean para efectuar predicciones y pronósticos meteorológicos. Por último, hay amplio reconocimiento de que los modelos climáticos actuales simulan en forma creíble el clima actual observado, lo que sugiere que se comprende en gran medida cómo funciona el sistema climático.

Los modelos climáticos y meteorológicos aplican a la atmósfera las ecuaciones del movimiento de fluidos, de la física y de la química. Dado que la atmósfera es sumamente variable en el tiempo y el espacio, para poder predecir su estado cambiante (es decir, el estado del tiempo), estos sistemas de ecuaciones deben resolverse para un gran número de puntos de la atmósfera (tanto horizontal como verticalmente). Si estas simulaciones se realizan durante un período prolongado, pueden estimarse tanto el estado promedio del sistema como su variabilidad intrínseca (es decir, el clima). Puesto que deben resolverse numerosas ecuaciones en un gran número de puntos durante un período prolongado, estos modelos se elaboran como programas informáticos que se ejecutan en computadoras de alto rendimiento. Estos ***modelos climáticos y meteorológicos*** se emplean para pronosticar el tiempo a corto plazo y para estudiar cómo reacciona el sistema climático a distintos tipos de cambios, o ***forzamientos*** (por ejemplo, variaciones en la energía emitida por el sol, aumentos de la concentración de gases de efecto invernadero o cambios en el uso de la superficie terrestre). Una vez que estos modelos se someten a pruebas y se comprueba su validez en cuanto al clima actual, pueden emplearse para simular el cambio climático pasado y futuro.

Para poder simular el cambio climático futuro, debemos representar los cambios posibles o previstos de los forzamientos climáticos, tanto naturales como antropogénicos (inducidos por el hombre). Algunos forzamientos naturales - como la variación de la energía emitida por el sol - funcionan a través de mecanismos físicos razonablemente bien comprendidos y pueden incluirse en las proyecciones del estado del clima futuro; otros - como la emisión de gases y partículas de origen volcánico a la atmósfera - son menos predecibles. Los forzamientos de origen humano se sitúan entre estos dos extremos, es decir, no son ni muy predecibles ni esencialmente aleatorios. Estos forzamientos humanos, incluida la emisión de gases de efecto invernadero, obedecen a

muchos factores subyacentes, como el crecimiento demográfico, el desarrollo económico y la tecnología. Para tener en cuenta estos factores, debemos elaborar ***escenarios*** que describan cómo variará la concentración de gases de efecto invernadero en el tiempo. Una vez elaborados, se los puede utilizar como insumos en los modelos climáticos para preparar proyecciones sobre los correspondientes cambios en el sistema climático. El IPCC preparó una serie de escenarios de emisión de gases de efecto invernadero basados en distintos supuestos acerca del desarrollo económico y tecnológico a lo largo del próximo siglo, que se utilizaron para preparar proyecciones sobre la concentración atmosférica de los gases de efecto invernadero en los modelos climáticos.

Puesto que no se cuenta con un segundo planeta Tierra para realizar "experimentos climáticos", ni se tiene el tiempo para esperar los resultados de los actuales "experimentos" con el planeta, los modelos climáticos, complementados con los escenarios sobre la emisión de gases de efecto invernadero, son la mejor herramienta para comprender cómo reaccionará el sistema climático a los forzamientos antropogénicos.

El Modelo de Circulación General (MCG)

El MCG es un modelo numérico avanzado que procura simular todas las partes y procesos del sistema climático. A veces se lo incluye entre los "modelos climáticos mundiales", pero muchos otros modelos más sencillos también podrían llevar esa denominación. En realidad, el MCG no es un modelo climático, sino que es un modelo que simula las tendencias meteorológicas diarias para agregarlas estadísticamente y así obtener estados climáticos, exactamente de la misma forma en que se emplean observaciones meteorológicas diarias para conocer los estados climáticos efectivos. De hecho, el MCG es, en esencia, muy similar a los modelos que se emplean en el pronóstico meteorológico. Existen MCG atmosféricos y oceánicos (MCGA y MCGO, respectivamente). Los MCGA y los MCGO pueden combinarse para elaborar un modelo de circulación general (atmosférico y oceánico) integrado (MCGAO). Puesto que el cambio climático se relaciona con las interacciones entre la atmósfera y el océano, el uso del MCGAO ha pasado a ser de aceptación general. Una tendencia reciente es ampliar los MCG para crear modelos del sistema terrestre que incluyan, por ejemplo, sub-modelos de química atmosférica o un modelo del ciclo del carbono, o de vegetación interactiva (dinámicos), pero estos modelos están aún en una etapa de desarrollo muy incipiente.

El Modelo Climático Regional (MCR)

Dada la creciente certidumbre de que se está produciendo un cambio climático inducido por el hombre, el IPCC subraya que la atención se está centrando menos en estudiar los fundamentos de la ciencia climática mundial y más en comprender mejor el cambio climático y en hacer frente a sus impactos. Un aspecto fundamental de esta transición es la necesidad de producir información exacta y precisa sobre dicho cambio a escala local y regional. Las proyecciones del IPCC y otras proyecciones actuales del cambio climático se apoyan en modelos del clima mundial, que, por exigir grandes recursos informáticos, incluso de las supercomputadoras más poderosas, deben calcularse con una baja resolución horizontal (aproximadamente 150 km en el caso de muchos de los modelos que el IPCC utilizó para preparar el Cuarto Informe de Evaluación, AR4). Como recalca el IPCC, los resultados a escala mundial son útiles para indicar las características generales y las pautas del cambio climático a gran escala, pero no son muy robustos a escala local o regional (generalmente entre 10 km y 20 km). Esto se debe a dos motivos principales: i) los modelos mundiales solo pueden resolver explícitamente aquellos procesos físicos que tienen lugar en extensiones de varios cientos de kilómetros o más; y ii) especialmente sobre tierra, las heterogeneidades de la superficie espacial pueden ser muy grandes y ocurrir a pequeña escala espacial (por ejemplo, regiones de topografía compleja; diferentes patrones del uso del suelo, etc.). Esta heterogeneidad espacial puede tener una marcada influencia sobre el clima regional, pero obviamente puede ser difícil o incluso imposible representarla en forma realista utilizando la baja resolución de los modelos mundiales (gráfico 3). No obstante, la mayoría de los impactos sobre el cambio climático se producirán precisamente a la escala más pequeña, de entre 10 km y 20 km, y es a esta escala que necesitan comprenderse y abordarse. Una cuestión clave que se plantea con respecto al uso de los modelos climáticos es cuál es la mejor manera de reducir la

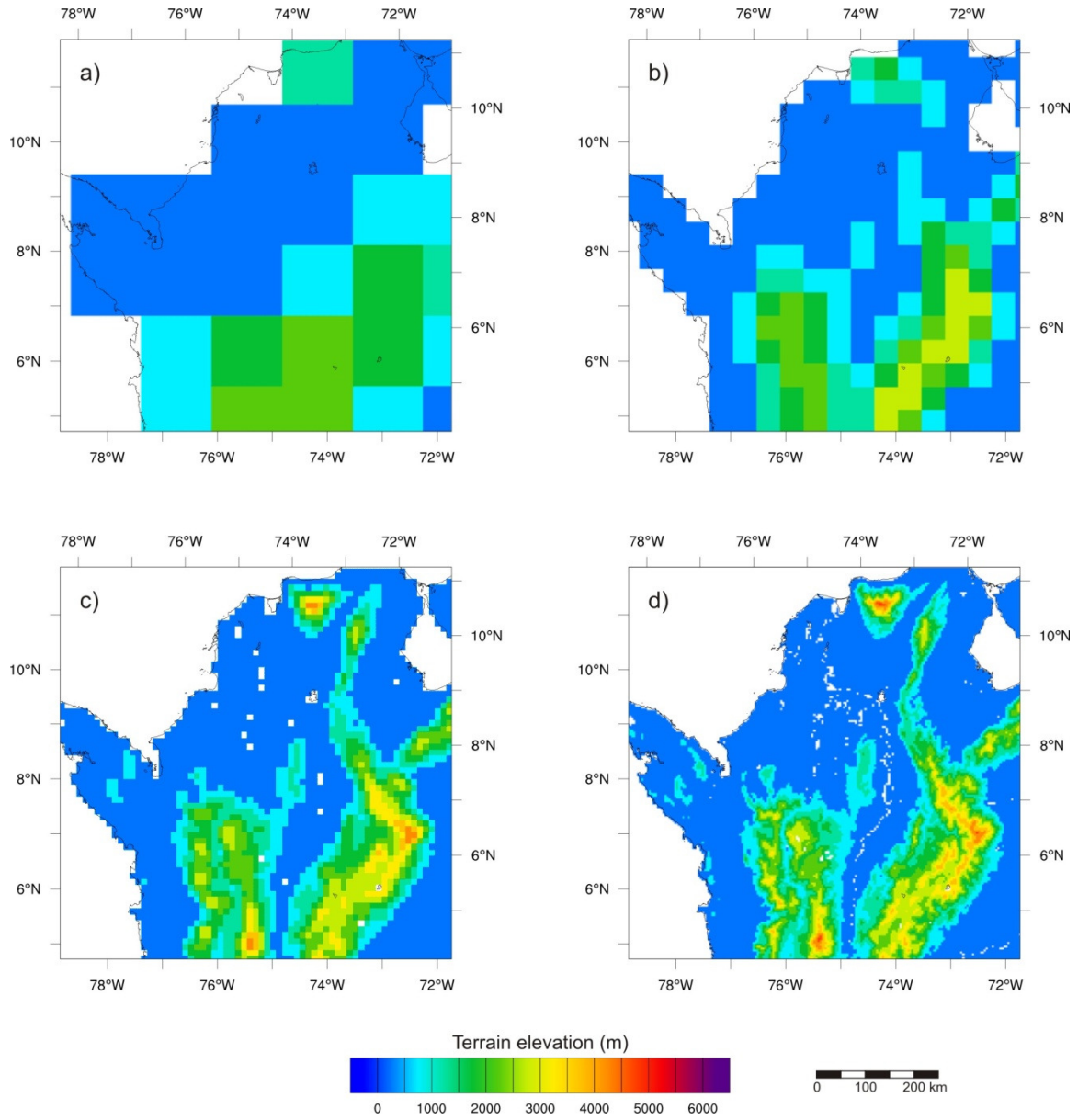
Pasos a seguir para elaborar escenarios sobre el cambio climático regional

Los escenarios de cambio climático regional en el marco del calentamiento mundial atribuible al aumento de la emisión de GEI se elaboran siguiendo los siguientes pasos:

1) Escoja el escenario de "emisión" de gases de efecto invernadero (por ejemplo, se mantiene el *status quo*, estabilización, compromiso) para el cual se desea estimar el cambio climático regional.
2) Seleccione el (los) modelo(s) climático(s) mundial(es) a utilizar; compruebe que dispondrá de resultados de las simulaciones al menos dos veces por día.
3) Si es necesario, ejecute su propio modelo mundial, ¡PERO utilice los modelos mundiales disponibles siempre que sea posible!
4) Ejecute controles del MCR utilizando observaciones como forzamientos (reanálisis) para verificar que el modelo sea razonablemente capaz de simular el clima actual.
5) Ejecute el MCR utilizando el MCG como forzamiento.

escala de los resultados de los modelos mundiales de baja resolución para describir regiones individuales - y localidades específicas dentro esas regiones - a fin de obtener resultados que sean físicamente precisos y, por lo tanto, significativos.

Gráfico 3. Aumento de la resolución sobre la geografía terrestre y oceánica de los modelos



Nota: El efecto de incrementar la resolución sobre la geografía terrestre y oceánica de los modelos y de dar resolución a la altura del terreno. Tamaño de la cuadrícula característico de a) modelo de circulación general (144 km), b) modelo climático regional de baja resolución (48 km), c) modelo climático regional de resolución mediana (12 km) y d) modelo climático regional de alta resolución (4 km).

Los MCR son esencialmente versiones de los modelos de circulación general calculados para una superficie limitada (o dominio), no para el conjunto del planeta. Estos modelos se emplean para hacer frente a las limitaciones de escala horizontal del modelo de circulación general; este último tiene una resolución horizontal de entre 100 km y 300 km, en tanto que un modelo climático regional puede ejecutarse con una resolución horizontal de entre 10 km y 50 km. En esencia, pueden utilizarse para *reducir físicamente la escala* de los resultados del modelo mundial a una escala regional, e incluso local. Conforme la extensión del dominio y la resolución, a veces las simulaciones de los MCR también exigen grandes recursos informáticos, lo cual ha limitado la duración de muchos de los experimentos realizados hasta la fecha. En el gráfico 3 se indican los efectos sobre la topografía y las costas cuando la baja resolución de un MCG se reemplaza por la resolución más alta de un MCR.

Aunque puede ser interesante contar con predicciones explícitas del cambio climático en nuestra propia localidad, estas predicciones solo son útiles si proporcionan información valiosa para elaborar metodologías que respalden sistemas disponibles para la toma de decisiones, a través de los cuales pueden evaluarse los impactos del cambio climático sobre toda la gama de sistemas humanos y naturales. El uso de predicciones del cambio climático en los estudios de impacto representa una transición en cuanto a que la atención se está centrando menos en la *ciencia básica* (comprensión de la física del cambio climático) y más en la *ciencia aplicada* (evaluación de las consecuencias prácticas de estos cambios para otros sistemas naturales y humanos). Esta evaluación es un requisito previo esencial para formular estrategias de adaptación y/o mitigación. Esta transición ha sido notoriamente difícil de efectuar, y la brecha resultante entre la ciencia básica y la ciencia aplicada se ha llamado, en términos coloquiales, “el valle de la muerte”. Construir un puente para cruzar este valle es el principal objetivo a perseguir.

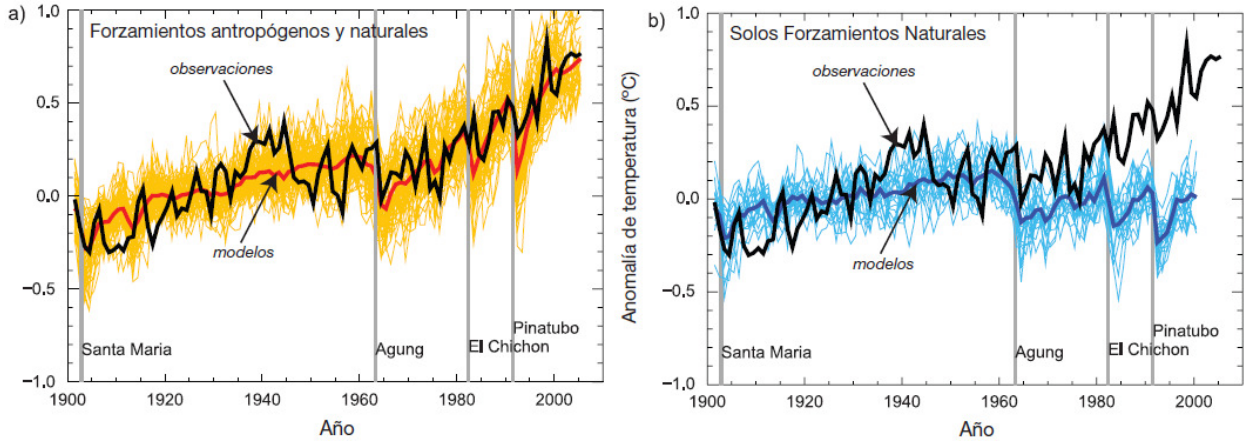
Verificación e incertidumbre de los modelos

Realizar simulaciones del cambio climático, incluso a una escala regional de alta resolución, es muy útil; comprender las virtudes y deficiencias del modelo de modo que la incertidumbre de los modelos climáticos pueda tenerse en cuenta en el proceso de toma de decisiones es también esencial para dicho proceso. La principal interrogante de cualquier modelo es esta: “¿Cuán bien

hace lo que le pedimos?" La respuesta nos indica el grado de confianza que podemos tener en los resultados del modelo; el grado de comprensión que tenemos del problema analizado, y qué parte del modelo es la que más necesita mejoras. Aunque es fácil expresarlo con palabras, *CÓMO* lograrlo es más difícil: ¿cuál de los datos que nos proporciona el modelo queremos verificar? ¿Qué observaciones utilizaremos? ¿Cómo cuantificaremos los resultados? Dos consideraciones clave pueden desprenderse fácilmente. La primera se refiere a la *escala mundial*: ¿Con qué precisión simula el modelo climático mundial (empleado para proporcionar el forzamiento a gran escala) el clima observado? La otra se refiere a la *escala regional:* ¿mejora el modelo climático regional las simulaciones que proporcionan los modelos mundiales?

Como ejemplo de escala mundial, el gráfico 4 muestra que los modelos de clima mundial no pueden reproducir el calentamiento observado recientemente, sin incluir forzamientos antropogénicos (particularmente, emisiones de GEI). Aunque todos los modelos coinciden en la dirección del cambio, difieren en cuanto a la magnitud del cambio proyectado. Además, como ya se señaló, los modelos mundiales se consideran generalmente adecuados para simular el clima actual.

Gráfico 4. Comparación entre las anomalías del promedio mundial de la temperatura de superficie y las simulaciones MCGAO



Fuente: Extraído de IPCC, AR4, WG-I, gráfico 9.5.
Nota: Comparación entre las anomalías del promedio mundial de la temperatura de superficie (°C) calculado a partir de observaciones (en negro) y las simulaciones MCGAO aplicando **a)** forzamientos tanto antropogénicos como naturales y **b)** forzamientos naturales únicamente. Todos los datos se expresan como anomalías de la temperatura media global con respecto a las observaciones del período comprendido entre 1901 y 1950 (en negro) del conjunto de datos mediante cuadriculado sobre la temperatura de superficie preparado por la unidad de investigación climática del Hadley Centre y, en **(a)** según datos obtenidos de 58 simulaciones elaboradas con 14 modelos con forzamientos tanto antropogénicos como naturales. El valor medio del conjunto multimodelo se indica mediante una

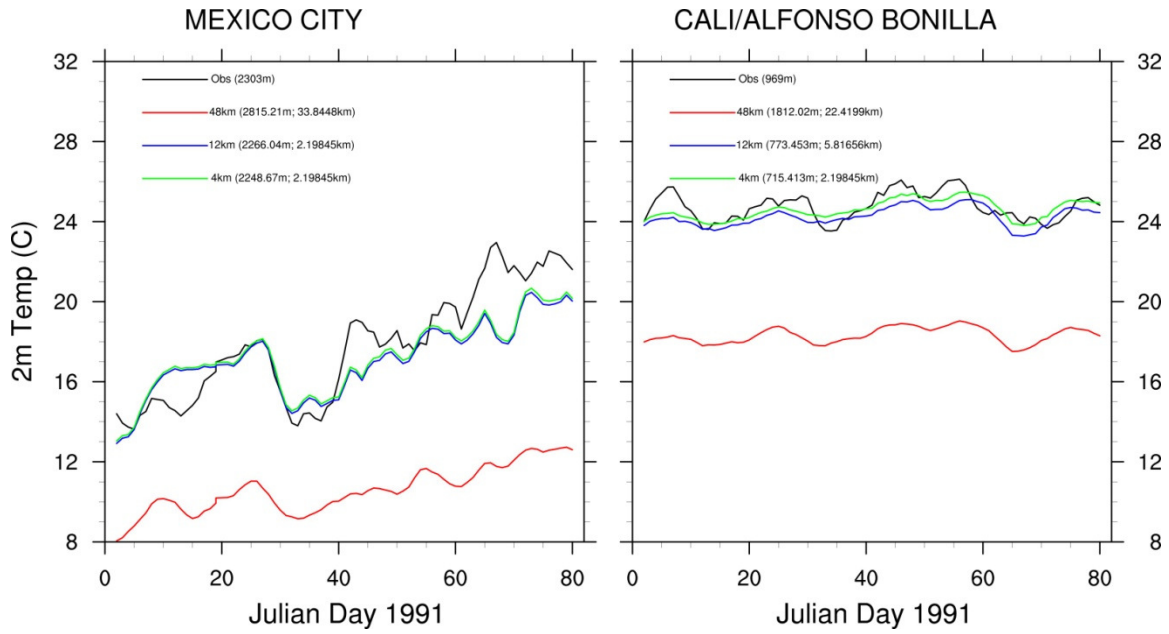
curva roja ancha, en tanto que las simulaciones individuales se representan mediante curvas amarillas estrechas. Las líneas grises verticales indican las fechas de eventos volcánicos de gran magnitud. Las simulaciones que concluían antes de 2005 se ampliaron hasta ese año utilizando, cuando fue posible, los primeros años de las simulaciones basadas en el caso hipotético A1B del IE-EE del IPCC que se extendían de las simulaciones correspondientes del siglo XX. Las anomalías simuladas del promedio de temperatura mundial en **(b)** proceden de 19 simulaciones elaboradas a partir de cinco modelos con forzamientos naturales únicamente. El valor medio del conjunto multi-modelo se indica mediante una curva azul ancha y las simulaciones individuales a través de curvas azules estrechas. Se seleccionan simulaciones que no exhiben una desviación excesiva en sus simulaciones de control (no más de 0,2°C por siglo). Cada simulación se elaboró por muestreo, de modo que la cobertura corresponde a la de las observaciones.

Como ejemplo a escala regional, en el gráfico 5 se presentan series cronológicas de la temperatura de superficie en Cali, Colombia, y en la Ciudad de México, DF. Se indican los valores observados y varias series generadas con el modelo de clima regional de Investigación y Previsión Meteorológica (WRF, por sus siglas en inglés). Se constata lo siguiente: 1) la simulación del modelo depende de la resolución horizontal, obteniéndose los mejores resultados con la resolución más alta; 2) los resultados del modelo de alta resolución de 12 km y 4 km coinciden en gran medida con los valores observados.

Cuestiones que se plantean en la cuantificación de la incertidumbre

Aunque el IPCC llega a la conclusión de que la mayoría de las fuentes de incertidumbre a escala regional son similares a las que se observan a escala mundial, señala dos excepciones importantes: 1) la falta de homogeneidad en la cubierta terrestre y los cambios en el uso de la tierra, y 2) los forzamientos como resultado de aerosoles atmosféricos. Estas excepciones revisten importancia crítica para América Latina porque el cambio climático atribuible a cambios en el uso del suelo, como la urbanización y la deforestación, puede ser muy grande, y si la deforestación se produce por la vía de quemas, por ejemplo, constituye una de las principales fuentes de aerosoles, que también pueden tener un impacto importante sobre el clima regional, casi seguramente a través del enfriamiento y la desecación.

Gráfico 5. Series cronológicas de la temperatura



Nota: Series cronológicas de la temperatura (°C) correspondientes a los primeros 80 días de 1991 de una simulación WRF con resoluciones de 48, 12 y 4 km y comparados con las observaciones de las estaciones meteorológicas de Ciudad de México y Cali, Colombia. En la leyenda se indica la elevación real de cada estación meteorológica, así como la elevación y la distancia de la estación meteorológica del punto de la cuadrícula del WRF más cercano.

Evidentemente, queremos utilizar observaciones reales para validar en la mayor medida posible la capacidad de nuestros modelos para simular el clima actual. Comparar los resultados del modelo con los valores observados solo es útil hasta cierto punto: ¿Cómo podemos evaluar la robustez de las simulaciones del cambio climático futuro? Al respecto, hay dos aspectos clave: 1) ¿cuáles son los factores de incertidumbre? ¿cómo se manifiestan y cómo se propagan de la escala mundial a la escala regional? y 2) ¿podemos estimar la probabilidad de que ocurran? ¿cuán robustas son estas funciones de densidad probabilística?

Construcción y evaluación de probabilidades

Ningún modelo puede considerarse "el mejor" para simular el cambio climático; debe utilizarse un enfoque basado en modelos múltiples. Esto plantea la posibilidad de realizar una evaluación probabilística de las proyecciones climáticas que se obtienen utilizando distintos modelos. Sin embargo, esto genera inmediatamente un problema importante: el sesgo de los modelos. Ningún

de los modelos simula perfectamente el clima actual; la diferencia entre el clima observado y el clima simulado representa el *sesgo del modelo*. En el caso del clima actual, este sesgo puede estimarse cuantificando la incertidumbre del modelo como se explicó anteriormente. Para la mayoría de los modelos, el sesgo es pequeño y los factores que lo crean, bastante bien conocidos, aunque el sesgo varía de un modelo a otro. El problema radica en que no hay ninguna garantía de que los sesgos del modelo utilizado para simular el cambio climático futuro sean los mismos que los que el modelo produce al simular el clima actual. Hasta que estos sesgos no se reduzcan al mínimo, se corrijan o, al menos, se comprendan, es difícil asignar probabilidades robustas a la posibilidad de ocurrencia de las predicciones de los modelos de cambio climático. Hasta la fecha se han empleado varios enfoques, de los cuales dos son especialmente ilustrativos: 1) se ha partido de la suposición de que los sesgos actuales son representativos de los sesgos futuros, y 2) se han usado los conocimientos especializados ya adquiridos para limitar los sesgos. Todos los enfoques apuntan a que habrá calentamiento y todos presentan características cualitativas similares, pero difieren en su evaluación probabilística de la magnitud del calentamiento. El enfoque 1, por ejemplo, asigna un grado de calentamiento ligeramente menor a la mayor probabilidad de ocurrencia que el enfoque 2. Por otra parte, la probabilidad de un calentamiento extremo (de más de 5°C), aunque sigue siendo bastante baja, es mayor en el enfoque 1. No es de sorprender que este ámbito sea actualmente objeto de investigaciones intensas. Al respecto, el IPCC hace hincapié en que el juicio experto de los climatólogos, los responsables de formular políticas y las partes interesadas desempeñarán un papel clave. Según el IPCC:

> Aún no se puede recomendar un método preferido [para estimar probabilidades], pero los supuestos y limitaciones en que se sustentan los distintos enfoques, y la sensibilidad de los resultados a estos supuestos y limitaciones, deben comunicarse a los usuarios (WG1, cap. 10, pág. 811; la traducción es nuestra).

Vulnerabilidad y evaluación de los impactos

Evaluaciones de la vulnerabilidad, e impactos regionales

Un *impacto* atribuible al cambio climático puede definirse como *un cambio específico que se produce en un sistema por su exposición al cambio climático.* Una *vulnerabilidad* se define

como el grado en que un sistema natural o humano es susceptible a los efectos negativos de un impacto atribuible al cambio climático, o incapaz de soportarlos. El sistema en cuestión puede ser natural o de tipo humano y socioeconómico, o algún híbrido de ambas categorías. El cambio puede ser beneficioso o perjudicial (¡no *TODOS* los efectos del cambio climático son necesariamente perjudiciales!). Por lo tanto, comprender las posibles vulnerabilidades puede ser complicado y no necesariamente obvio. De importancia crítica: los sistemas naturales y humanos presentan una amplia gama de vulnerabilidades. El IPCC ha establecido siete criterios para identificar las principales vulnerabilidades: 1) *magnitud de los impactos,* 2) *cronología de los impactos*, 3) *persistencia y reversibilidad de los impactos*, 4) *probabilidad (estimaciones de incertidumbre) de los impactos y las vulnerabilidades y grado de confianza en esas estimaciones*, 5) *potencial de adaptación*, 6) *aspectos relacionados a la distribución de los impactos y las vulnerabilidades (cuestiones de equidad)* y 7) *importancia del sistema o de los sistemas que corren riesgo.* Asimismo, pueden identificarse las siguientes *categorías de vulnerabilidad*: sistemas sociales mundiales, sistemas regionales, sistemas biológicos mundiales, sistemas geofísicos, eventos extremos.

Reviste importancia crítica señalar que la evaluación de las vulnerabilidades clave se caracteriza por un grado importante de *incertidumbre científica* y presupone formular *juicios de valor*. Además, dada la complejidad de estos temas y de consideraciones que no guardan relación con el clima, se debe mantener un *registro rastreable* de todos los supuestos pertinentes para *lograr transparencia.* Además, hay que recordar lo siguiente: 1) la vulnerabilidad al cambio climático varía considerablemente de un grupo socioeconómico a otro y, por lo tanto, plantea cuestiones de equidad, y 2) ninguna medida única de los impactos climáticos puede proporcionar una base de aceptación general para la toma de decisiones en materia de políticas sobre el clima.

Aviso clave para Mesoamérica: *¡Las regiones menos desarrolladas de baja latitud son probablemente las que corran el mayor riesgo!* Esto *no significa* que los cambios climáticos sean más pronunciados en zonas de baja latitud; de hecho, tanto las observaciones como los modelos indican que los mayores cambios ocurrirán en las zonas de alta latitud. Son las características de sus sistemas humanos las que exponen esta región a un riesgo mayor. Los países en desarrollo de baja latitud, en general, y los de Mesoamérica en particular, tienen estructuras económicas y sociales que incrementan su susceptibilidad o vulnerabilidad a los impactos del cambio climático.

Estrategias para hacer frente a las principales vulnerabilidades

Una vez identificadas las vulnerabilidades, ¿cómo se les puede hacer frente? Es importante comprender que la necesidad fundamental es la de una ***gestión de riesgos*****.** La primera consideración es la de ***adaptación***, es decir, ¿hay formas de soportar o hacer frente al cambio? En general, tratándose de sistemas sociales, las posibilidades de adaptación son considerables, pero los costos económicos no son bien conocidos (en el mejor de los casos) y no se distribuyen equitativamente. En el caso de los sistemas biológicos y geofísicos, las posibilidades de adaptación son mucho más limitadas. En general, la adaptación se vuelve más difícil cuanto mayor o más rápido es el cambio.

Si no es posible o factible adaptarse a un cambio, la alternativa es intentar evitar que el cambio ocurra, es decir, intentar *mitigarlo*. En este caso, la mitigación consistiría en reducir considerable e inmediatamente las emisiones de GEI. Esto debe hacerse a nivel mundial porque estos gases están muy mezclados en la atmósfera. Es decir, independientemente de donde sean emitidos, estos gases afectan a todo el planeta. No está claro que los países tengan la capacidad, y menos aún la voluntad, de hacerlo (de hecho, este informe se está preparando en momentos en que expertos científicos y responsables de la formulación de políticas se reúnen en Cancún para negociar estos temas). Asimismo, los estudios del IPCC e incluso estudios más recientes apuntan a que es posible que, en algunos sistemas, ya se haya alcanzado el punto crítico[2], incluso a los niveles actuales de concentración de GEI. Una vez que se alcance este punto, la mitigación generalmente deja de ser una opción, quedando la adaptación como única posibilidad.

La incertidumbre en la evaluación de las estrategias de respuesta

No es suficiente considerar únicamente la incertidumbre de los productos de los modelos climáticos. Es importante destacar que la evaluación de las estrategias apropiadas para hacer frente al cambio climático también adolece de incertidumbres, que son de diversa índole, a saber:

- *Aleatoriedad natural.* La variabilidad caracteriza a *todos* los sistemas naturales, no solo los que se relacionan con el clima. Se deben evaluar estas diferentes variabilidades, pero con frecuencia no queda claro cómo hacerlo.

[2] El punto crítico se refiere al umbral que, una vez que un sistema humano o natural lo sobrepasa, el retorno al estado original es difícil o imposible. Por ejemplo, una vez que un bosque desaparece de una región, es posible que nunca vuelva a existir.

- *Falta de conocimientos científicos.* Esto incluye tanto la ciencia física de los sistemas naturales como la ciencia social de los sistemas humanos.
- *Selección social* ("*incertidumbre reflexiva*"). ¿Cómo responderán los seres humanos a nivel individual y, a nivel agregado, los sistemas sociales, al cambio climático y, sobre todo, a la incertidumbre que lo rodea?
- *Diversidad de valores.* Dentro de una sociedad hay distintos segmentos que pueden tener diferentes conjuntos de valores, los cuales dependen de factores como la posición económica, o bien diferentes creencias religiosas o convicciones políticas.

Algunos de estos factores de incertidumbre son fáciles de clasificar desde el punto de vista probabilístico; otros resultan más difíciles y, en muchos casos, son componentes esenciales el criterio o el grado de convicción.

Agentes de cambio que compiten entre sí

¡El calentamiento mundial resultante del aumento de la emisión de GEI no es, de ninguna manera, el único agente importante del cambio climático! Factores como los cambios en el uso del suelo, sobre todo, pueden ser importantes a nivel local. Por ejemplo, la deforestación en Mesoamérica puede tener sobre el clima impactos regionales tan pronunciados *o incluso más pronunciados* que los resultantes del aumento de la emisión de GEI. Asimismo, los efectos de la deforestación tienden a *exacerbar* los que se deben a la emisión de estos gases. Otros agentes, como el aumento de los aerosoles atmosféricos, pueden contribuir al enfriamiento que tiende a *atenuar* los efectos de los GEI, aunque, en muchos casos, estos aerosoles son contaminantes que pueden tener otros efectos nocivos.

Implicaciones del cambio climático para la región mesoamericana

En el gráfico 6 se presentan las variaciones de temperatura y precipitación sobre América Central y América del Sur de las simulaciones MMD-A1B[3] del IPCC efectuadas con 21 modelos climáticos mundiales. Sobre la base de los análisis de estos modelos, en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (WG-I, capítulo 11) se presenta el siguiente resumen sobre Mesoamérica:

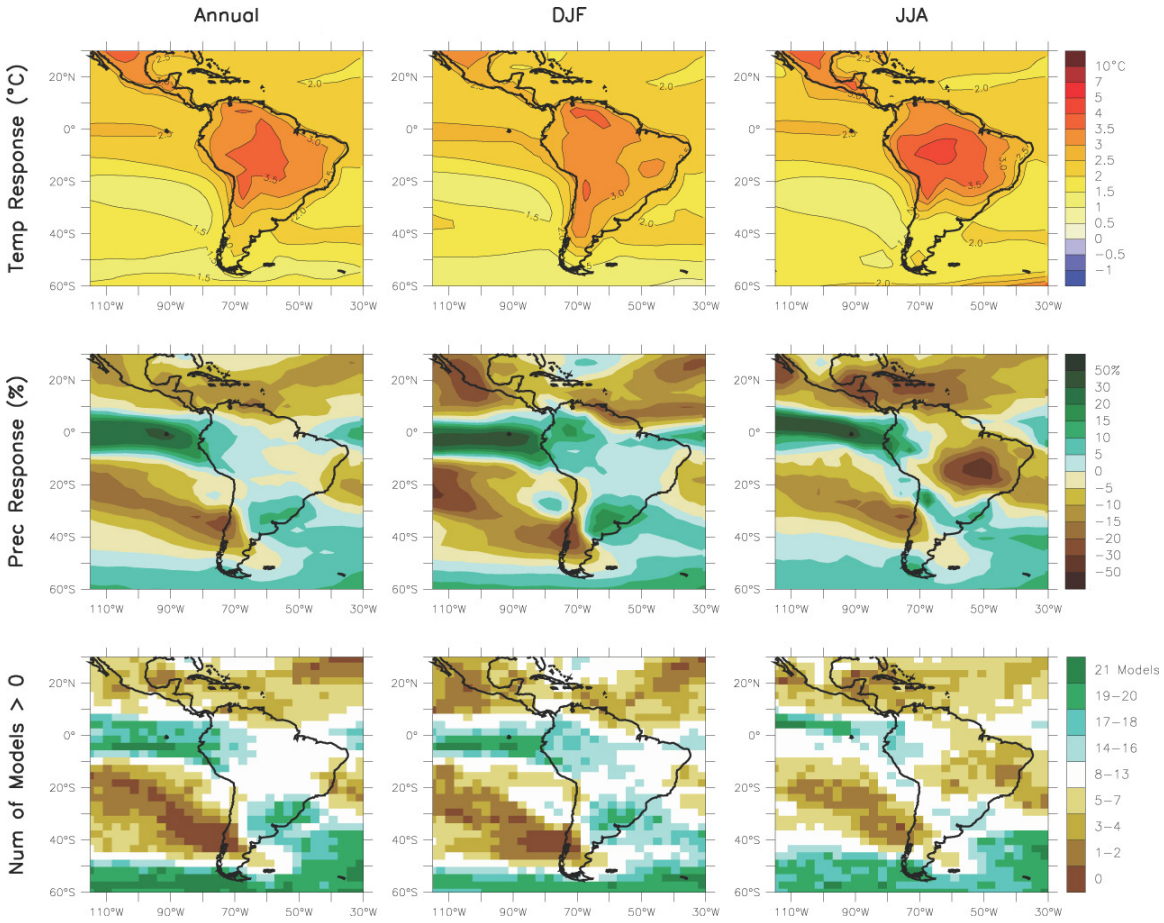
[3] Un elemento destacado del IPCC es la recolección de un conjunto integral de datos obtenidos por la aplicación de modelos, que aquí denominamos el "Conjunto de Datos Multimodelo (MMD, por sus siglas en inglés)". Gracias a estos datos, cientos de investigadores han podido estudiar a fondo los modelos desde una variedad de perspectivas.

> Es muy probable que el conjunto de América Central y América del Sur registre un calentamiento durante este siglo. Es probable que el calentamiento anual promedio sea mayor que el calentamiento mundial promedio. Asimismo, es probable que la precipitación anual en la mayor parte de América Central disminuya, a medida que la primavera boreal relativamente seca se vuelva incluso más seca. Una excepción a escala local es que el cambio en la circulación atmosférica podría inducir una gran variabilidad local en el cambio de precipitación en las zonas montañosas (la traducción es nuestra).

Además, el informe señala lo siguiente:

> Los errores sistemáticos en la simulación del estado actual promedio del clima tropical y de su variabilidad (Sección 8.6), y las grandes diferencias intermodales en los futuros cambios de amplitud del fenómeno El Niño, no permiten efectuar una evaluación definitiva de los cambios regionales en extensas zonas de América Central y del Sur. La mayoría de los modelos MMD no reproducen satisfactoriamente las pautas de precipitación regionales en sus experimentos de control y su relación "señal-ruido" es baja. Al igual que todas las masas terrestres, la retroacción de los cambios en el uso y la cubierta del suelo no se ha tenido satisfactoriamente en cuenta, y se presta a un cierto grado de incertidumbre. En América Central, los ciclones tropicales podrían ser una fuente adicional de incertidumbre para los escenarios regionales de cambio climático, ya que la precipitación en esta región durante el verano podría verse afectada por cambios sistemáticos en las trayectorias y la intensidad de los huracanes (la traducción es nuestra).

Gráfico 6. Cambios de temperatura y precipitación en América Central y América del Sur



Fuente: Eextraído de IPCC, AR4, WG-I, gráfico 11.15.
Nota: Cambios de temperatura y precipitación en America Central y América del Sur, de las simulaciones MMD-A1B. Hilera superior: promedio anual, DJF y JJA del cambio de temperatura entre 1980 y 1999 y entre 2080 y 2099, de promedios de 21 modelos. Hilera intermedia: igual que la primera, pero de la variación relativa del cambio de precipitación. Hilera inferior: de los 21 modelos, el número de ellos que proyectan un aumento de la precipitación.

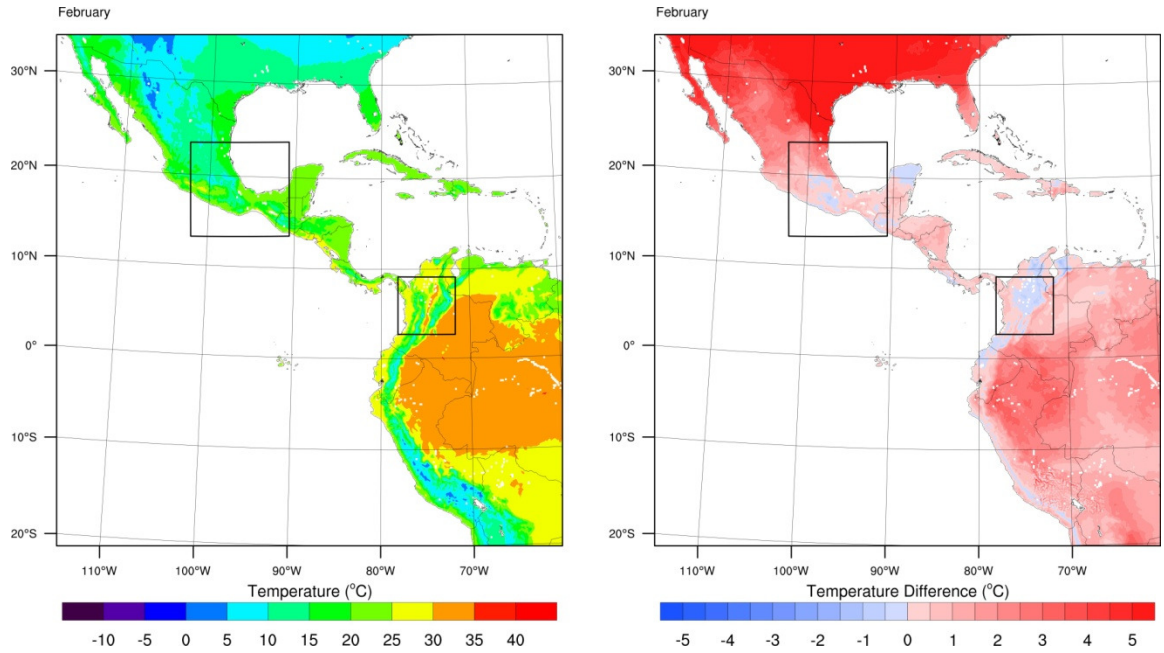
Resultados del modelo regional

Actualmente se está preparando un conjunto de escenarios de cambio climático para Mesoamérica con el modelo regional WRF. Un dominio de resolución espacial de 12 km incluye a toda Mesoamérica (más Perú y Jamaica). Partes de México central y Colombia se incluyen mediante dominios separados de 4 km incorporados dentro del dominio de 12 km. Todos los dominios se indican en los gráficos 7 y 10. Los forzamientos a gran escala proceden del escenario A2 (se mantiene el *status quo*) del modelo climático mundial del IPCC

correspondiente al período 2050 - 2052, junto con un control correspondiente al clima actual del período 2000 - 2002.

En el momento de redactar este informe (enero de 2010), estas simulaciones de modelo estaban en etapa de ejecución y se habían completado las correspondientes al primer año de cada una. Se han reproducido en este informe algunas de las representaciones gráficas preliminares, que se actualizarán periódicamente en la página web http://weather.unl.edu/RCM/reports/impacts/. Es esencial recordar que actualmente solo se presentan los resultados de un año. Todo cambio climático debe competir forzosamente con la variabilidad climática "natural" a corto plazo, que puede ser bastante pronunciada de un año al otro. Sin embargo, ya se vislumbran tendencias generales claras, y a medida que se sigan realizando las simulaciones (y se actualice la página web), los efectos de la variabilidad interanual empezarán a anularse entre sí y harán más obvia la señal de cambio climático a más largo plazo.

Gráfico 7. Temperaturas medias, México y Colombia

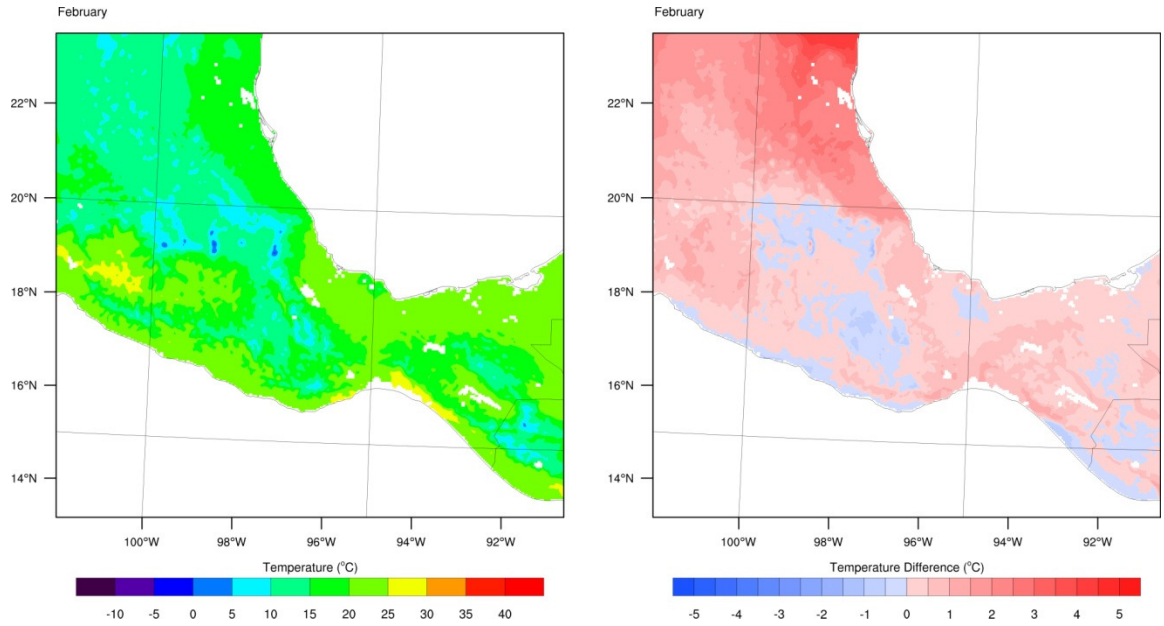


Nota: (a la izquierda) temperatura media mensual (°C) para febrero de 2050; (a la derecha) la diferencia entre la temperatura media mensual de febrero para 2050 menos 2000, del dominio del WRF de 12 km. En los recuadros se indica la ubicación de los dominios de 4 km de México y Colombia.

En el gráfico 7 pueden apreciarse las temperaturas de superficie del dominio básico de 12 km “Mesoamérica” en febrero de 2050, y las diferencias entre febrero de 2050 y febrero de 2000. En la representación gráfica correspondiente a 2050 se observa que la distribución de las temperaturas de superficie es realista, con controles latitudinales y altitudinales claramente observables. En relación con 2000, puede constatarse un calentamiento general, que es más pronunciado (aproximadamente 5°C) en el norte de México (y sur de Estados Unidos). Las zonas montañosas de México central, Guatemala, Costa Rica y Colombia solo presentan un pequeño cambio, o incluso un leve enfriamiento. Es prácticamente seguro que este enfriamiento sea función de la variabilidad interanual, pero se desprende claramente que el cambio de temperatura en esas regiones es probablemente menor que en otras regiones. El resto de Mesoamérica presenta un calentamiento general de entre 1°C y 2°C.

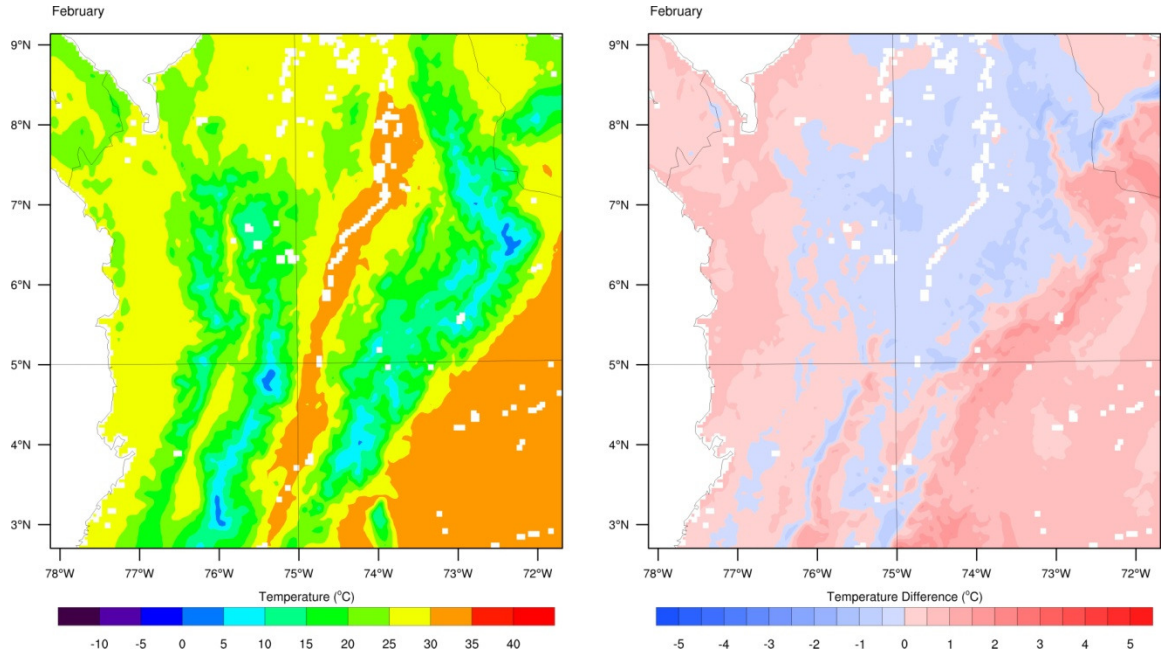
En el gráfico 8 se indican las temperaturas de superficie del dominio de 4 km de muy alta resolución “México” en febrero de 2050, y las diferencias entre febrero de 2050 y febrero de 2000. En el gráfico 9 se indican las temperaturas de superficie del dominio de 4 km de muy alta resolución “Colombia” en febrero de 2050 y las diferencias entre febrero de 2050 y febrero de 2000. En ambos casos, los resultados básicos son similares a los del dominio de 12 km, pero es evidente que la resolución de la topografía es mucho mejor. Se destaca claramente la ausencia de calentamiento en las grandes elevaciones.

Gráfico 8. Temperaturas medias, México



Nota: (a la izquierda) temperatura media mensual (°C) para febrero de 2050; (a la derecha) la diferencia entre la temperatura media mensual de febrero para 2050 menos 2000, del dominio del WRF de 4 km correspondiente a México.

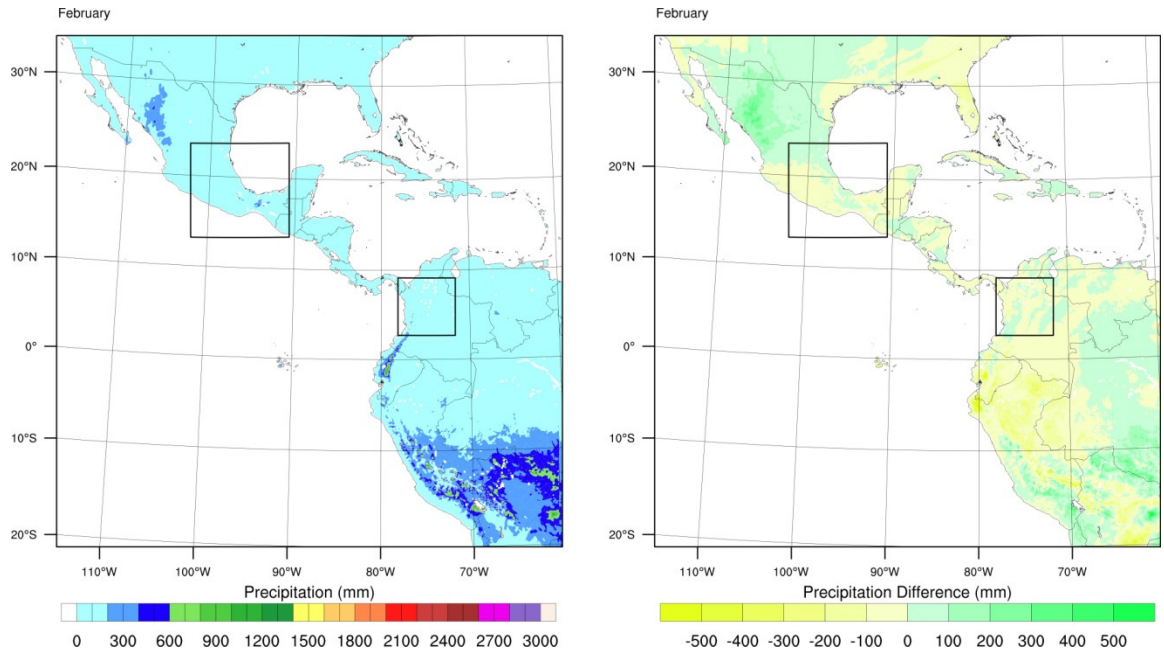
Gráfico 9. Temperaturas medias, Colombia



Notas: (a la izquierda) temperatura media mensual (°C) para febrero de 2050; (a la derecha) la diferencia entre la temperatura media mensual de febrero para 2050 menos 2000, del dominio del WRF de 4 km correspondiente a Colombia.

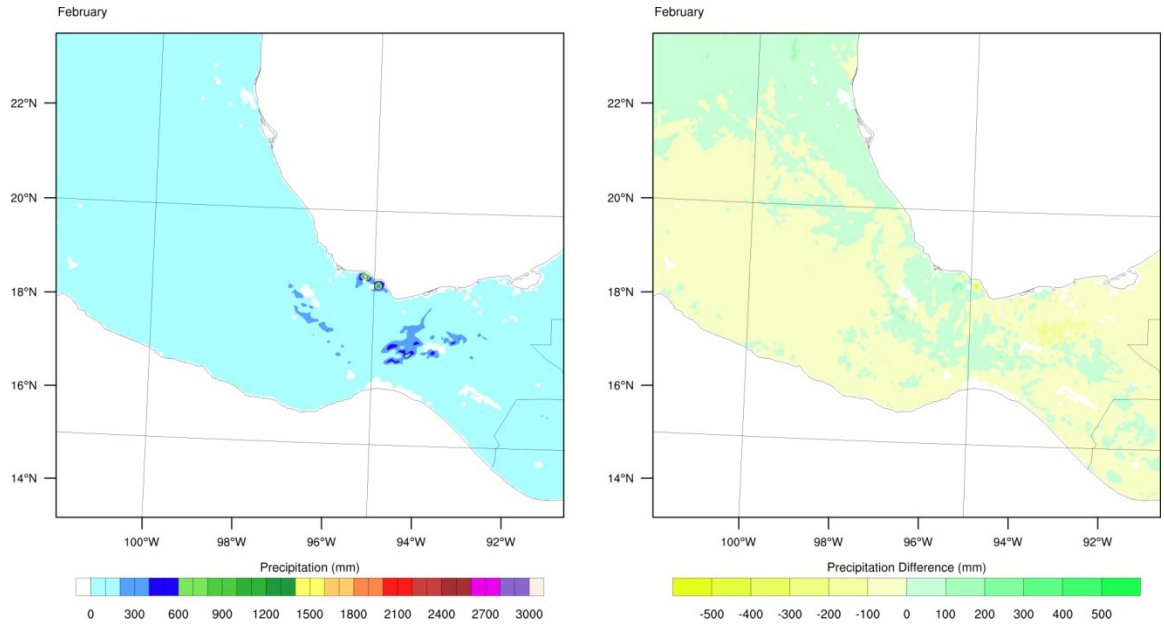
El gráfico 10 presenta la precipitación (lluvia y nieve) del dominio de 12 km en febrero de 2050, y la diferencia entre febrero de 2050 y febrero de 2000. En la representación gráfica correspondiente a 2050 se constatan fácilmente los efectos de las montañas y del istmo de bajo relieve de Tehuantepec. En comparación con 2000, se observa una mayor precipitación en el norte de México, al igual que en las regiones montañosas de Colombia. Aunque están fuera de la región de interés más inmediato, Ecuador y el norte de Perú presentan disminuciones muy grandes. En el sur de México y América Central, la respuesta es desigual; en algunas regiones la precipitación aumenta, en tanto que en otras disminuye. Esto contradice los estudios mundiales, que apuntan a una disminución general, pero sin una resolución adecuada de la abrupta y compleja topografía. Es evidente que estos controles topográficos sobre la precipitación son al menos tan importantes como en el caso de la temperatura. En los gráficos 11 y 12, estos efectos se aprecian incluso más claramente en el caso del centro de México y Colombia.

Gráfico 10. Precipitación total, México y Colombia



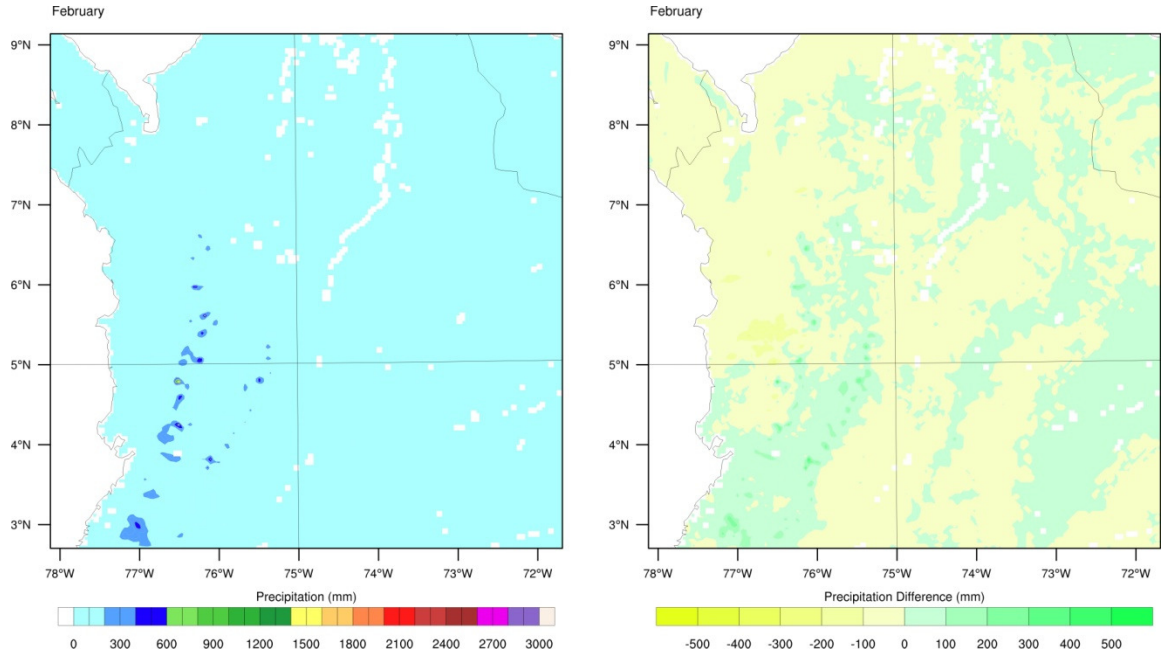
Nota: (a la izquierda) precipitación total mensual (mm) para febrero de 2050; (a la derecha) diferencia entre la precipitación total mensual para 2050 menos 2000, del dominio del WRF de 12 km. En los recuadros se indica la ubicación de los dominios de 4 km de México y Colombia.

Gráfico 11. Precipitación total, México



Nota: (a la izquierda) precipitación total mensual (mm) para febrero de 2050; (a la derecha) diferencia entre la precipitación total mensual para 2050 menos 2000, del dominio del WRF de 4 km de México.

Gráfico 12. Precipitación total, Colombia



Nota: (a la izquierda) precipitación total mensual (mm) para febrero de 2050; (a la derecha) diferencia entre la precipitación total mensual para 2050 menos 2000, del dominio del WRF de 4 km de Colombia.

Resumen y pasos futuros

La región mesoamericana ya está sufriendo los efectos del cambio climático. Además, debido a su limitada capacidad de adaptación, en gran medida producto de su contexto socioeconómico, es muy vulnerable. Por lo tanto, reviste importancia primordial ayudar a respaldar a estos países en sus esfuerzos por comprender y hacer frente a los efectos del cambio climático. La información que proporcionan los modelos climáticos más avanzados constituye un aporte muy valioso al proceso de planificación y formulación de políticas. No obstante, los resultados de estos modelos no siempre son fáciles de comprender para los responsables de tomar decisiones, que se enfrentan al impacto del cambio climático pero que no necesariamente están familiarizados con la ciencia en que se sustentan los modelos o con la interpretación de sus resultados. El presente informe ha procurado satisfacer estas necesidades.

El clima se define como las estadísticas meteorológicas; la variabilidad a pequeña escala, de algunas décadas o menos, suele denominarse variabilidad climática, en tanto que la variabilidad a una escala cronológica mayor que la de unas pocas décadas suele denominarse cambio climático. Puesto que no podemos realizar experimentos de laboratorio, se necesitan modelos climáticos para poder formular predicciones del cambio climático futuro, especialmente como consecuencia del aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Aunque los modelos climáticos mundiales simulan adecuadamente el clima de hoy en día, su resolución horizontal es demasiado rudimentaria para realizar estudios de impacto a escala regional. Para realizar dichos estudios se requieren modelos climáticos regionales, sobre todo en los casos en que existen fuertes controles topográficos sobre el clima.

Un impacto atribuible al cambio climático se refiere a un cambio que se produce en un sistema natural o humano por su exposición al cambio climático; este impacto puede ser dañino o beneficioso. Si un sistema puede sufrir efectos negativos por dicha exposición, se dice que es vulnerable. La necesidad fundamental es la de la ***gestión de riesgos***. La primera consideración es de ***adaptación***, es decir, ¿hay formas de soportar o hacer frente al cambio? Aviso clave para Mesoamérica: ¡*Las regiones menos desarrolladas de baja latitud son probablemente las que corran el mayor riesgo!* Esto *no significa* que los cambios climáticos vayan a ser probablemente más pronunciados en zonas de baja latitud; son las características de los sistemas humanos las que exponen los países en desarrollo de esta región a un riesgo mayor. Por último, el aumento de

la emisión de gases de efecto invernadero no es el único cambio climático posible que enfrenta Mesoamérica; otros efectos regionales atribuibles a la deforestación y los aerosoles también pueden ser importantes.

Se han identificado dos medidas suplementarias de importancia clave que deberán adoptarse a la brevedad.

1) Seguir elaborando escenarios de cambio climático regional. Además de los que se están ejecutando actualmente, es necesario empezar a planificar los escenarios mundiales para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5) cuya publicación está prevista para 2012.
2) Establecer programas piloto en que los científicos en el ámbito de la modelización climática, los interesados (es decir, los afectados por los impactos del cambio climático) y los responsables de las políticas puedan discutir a fondo cómo utilizar los resultados de los modelos para determinar la vulnerabilidad y posteriormente formular estrategias de adaptación adecuadas.