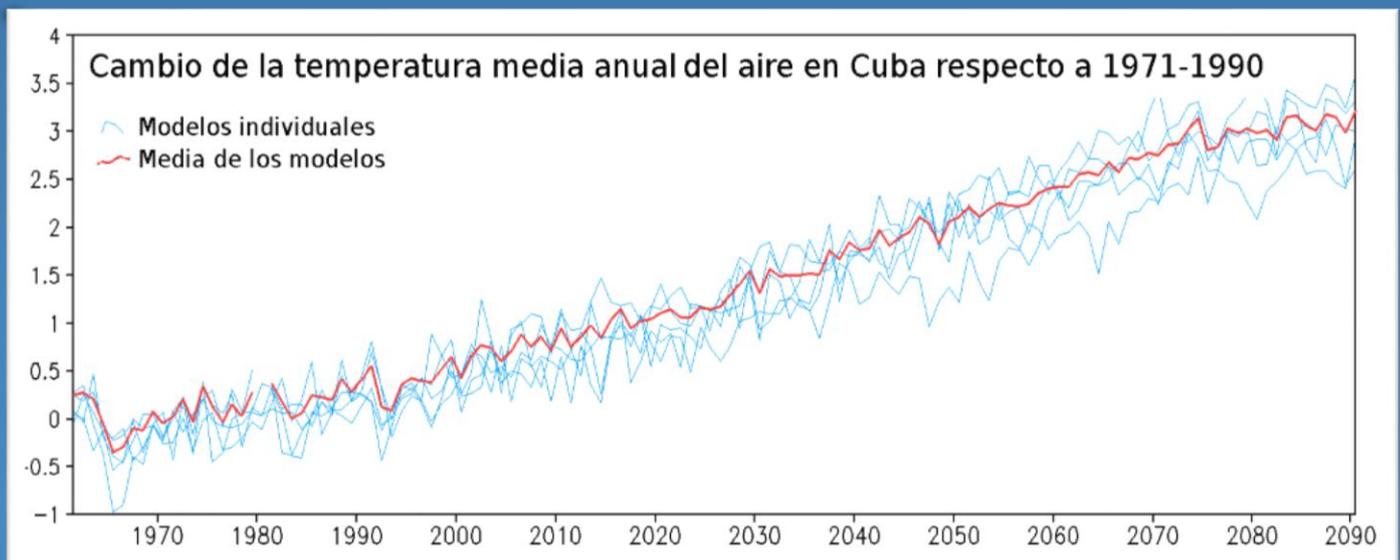


Los Modelos Climáticos y la Estimación del Clima Futuro

Por: Abel Centella Artola, Instituto de Meteorología



Este texto es un material divulgativo que ha sido producido con el apoyo del Proyecto "Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático".

Gráfico de la página de cubierta: Cambio de la temperatura media anual del aire en Cuba según el modelo PRECIS alimentado por varios modelos globales. El período de referencia fue 1971-1990. Producido por el Proyecto SUPERCLIMA.

Los Modelos Climáticos y la Estimación del Clima Futuro

Por: Abel Centella Artola, Instituto de Meteorología

La Habana
1 Junio del 2019

Índice

Una introducción necesaria	.....	6
¿Qué son los modelos climáticos?	.....	7
El espectro o sistema jerárquico de modelos climáticos ¿Qué es y por qué existe?	.....	8
¿Cómo se verifican los modelos climáticos?	.....	13
¿Cómo se usan los modelos climáticos para predecir el futuro?	.....	14
¿Cuán diferentes son los modelos de pronóstico del tiempo y los modelos climáticos?	.....	17
¿Por qué existe incertidumbre en la estimación del clima futuro?	.....	19
Uso de los modelos climáticos en Cuba. Una experiencia de trascendencia nacional y regional.	.....	20
A manera de Epílogo	.....	25

Los Modelos Climáticos y la Estimación del Clima Futuro

Una introducción necesaria

Intentar explicar el tema de los modelos y la modelación del clima futuro en un espacio relativamente reducido y en un lenguaje orientado a un público general, es una cuestión algo difícil, aunque ciertamente útil. Los modelos climáticos pueden ser tan simples como para que su formulación se escriba en un sobre de carta. También pueden ser extremadamente complejos, como para que se requieran varios miles de líneas de código de un programa de computadora. La gran mayoría de los textos que abordan este tema son extensos e incorporan numerosos elementos relacionados con el funcionamiento de la atmósfera y los océanos principalmente.

Un texto divulgativo como este sólo pretende poner en lenguaje simple este complejo y apasionante tema, para ayudar a comprender qué son los modelos climáticos. Para ayudar a aquellos que, estando lejos de las ciencias de la atmósfera y usan la información que los modelos climáticos generan, comprendan de dónde proviene la misma y cómo se produce. Para que se reconozca que existen diferencias entre los modelos y que dichas diferencias producen diferentes resultados que son igualmente válidos. Para explicar que las únicas y mejores herramientas existentes para estimar el clima futuro son los modelos climáticos. Para que se comprenda que cuando se dice “**modelo climático**” no se está hablando de una bola de cristal, ni de un método exacto que no se puede perfeccionar, ni de algo que se pueda criticar de forma desmedida.

El tema de la modelación del clima es de especial importancia para poder emplear e interpretar los resultados de los modelos. Más aun, es muy relevante para informar a los decisores. Poner el tema en lenguaje general es un reto difícil, pero muy útil.

Se ha tratado de que a lo largo de este texto los lectores pueden encontrar respuestas relativamente simples a la pregunta ¿Qué son los modelos climáticos? También se incorporan otras interrogantes válidas, entre las que se encuentran: ¿Todos los modelos climáticos son iguales y se usan para lo mismo? ¿Cómo se verifican los modelos

climáticos? ¿Cómo se usan los modelos climáticos para predecir el futuro? ¿Cuán diferentes son los modelos de pronóstico del tiempo y los modelos climáticos? ¿Por qué existe incertidumbre en la estimación del clima futuro? ¿Qué desarrollo y avance ha tenido este tema en Cuba?

¿Qué son los modelos climáticos?

Generalmente hablando, los modelos científicos son instrumentos que nos ayudan a trabajar con problemas complicados y a entender sistemas complejos. Ellos también permiten probar teorías y encontrar soluciones a diferentes escollos. Por esa razón se puede afirmar que los modelos son utilizados de forma casi permanente para explorar y entender cómo funcionan las cosas. Comúnmente al uso de los modelos se le denomina modelación.

Dado que son modelos, son aproximaciones de la realidad siempre tendrán errores. Así, se puede recordar que el notable científico norteamericano George Box sentenció; “todos los modelos están equivocados, pero algunos son útiles”. En ocasiones se pone el siguiente ejemplo, para que el público más distante

Los modelos climáticos son la mejor herramienta para proyectar el clima futuro, pero no son bolas de cristal. No se puede olvidar que “todos los modelos están equivocados, pero algunos son útiles”

al tema pueda comprender mejor. Se pide pensar en un mapa; algo que es muy familiar a la mayoría de las personas. El mapa es un modelo o aproximación de la realidad que se logra aplicando técnicas más o menos complejas. Es posible asegurar que aun los mejores mapas tienen errores de mayor o menor magnitud. Ahora bien, quien puede negar que los mapas de diferentes escalas o tipo son útiles.

En la práctica, uno de los mecanismos que se utilizan para entender las diferentes complejidades de la realidad, es desarmar los componentes complejos en partes más pequeñas. Una vez que las pequeñas partes se comprenden, entonces se combinan para comprender cómo funcionan en su conjunto. Se hace de manera similar a ir colocando adecuadamente las piezas de un complejo rompecabezas, de manera que permita entonces ver el panorama general.

En esencia, los científicos del clima utilizan modelos científicos compuestos de muchas partes pequeñas, para comprender y estudiar las complejidades del clima global. Al hacer esto, se está en capacidad de poder estimar o predecir cómo evolucionará el clima en el futuro.

En este punto ya se puede decir que los **modelos climáticos son modelos científicos**. Son las herramientas o instrumentos que se usan para saber cómo será el clima futuro. Científicamente hablando, se dice que el impacto de las perturbaciones

que la humanidad ha producido sobre el Sistema Climático¹ (el incremento de las emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero) puede ser proyectado, simulando todos los procesos claves que operan en el Sistema. Para eso se utilizan formulaciones matemáticas que se sustentan en principios físicos bien establecidos (p. ej. Leyes de Newton, entre otras muchas). Debido a la variedad y complejidad de procesos, tales formulaciones matemáticas sólo pueden ser implementadas en un programa para computadora, referido como modelo climático. En general, esas formulaciones se expresan como ecuaciones de diferencias parciales y se incluyen también otros valores de parámetros y condiciones de frontera (p. ej. características de la superficie terrestre, topografía, etc.). Las formulaciones o sistemas de ecuaciones de las que hablamos son tan complejas que no resulta posible resolverlas de forma analítica, utilizando papel y lápiz. La solución de las mismas debe hacerse por vías aproximadas, utilizando métodos numéricos y para ello se requiere el uso de las computadoras. Se reconoce que los modelos climáticos son las únicas y mejores herramientas para realizar la estimación futura del clima.

El espectro o sistema jerárquico de modelos climáticos ¿Qué es y por qué existe?

Como se expresó antes los modelos climáticos son derivados de las leyes físicas fundamentales, las cuales son sujetas a aproximaciones apropiadas para un sistema de escala global como lo es el Sistema Climático. Los medios computacionales que hoy existen y nuestro conocimiento de cómo funcionan las cosas son insuficientes y por ello limitan la resolución espacial en la cual es posible simular los procesos.

¿Qué quiere decir lo anterior? Pues simplemente que el Sistema (que es espacialmente continuo) tiene que ser dividido espacialmente (discretizado²) en partes más o menos pequeñas, dentro de las cuales se realizan entonces los cálculos de los diferentes procesos. Al discretizar el Sistema lo que se hace es dividirlo artificialmente formando una rejilla. En esa rejilla el mayor o menor tamaño de las cuadrículas (menor o mayor cantidad de cuadrículas) indica una menor o mayor resolución espacial, respectivamente. La distancia entre los puntos de la rejilla (cuadrículas) es Δx ; por ello cuando la resolución es baja (menos resolución) Δx es mayor. La discretización se

1 Sistema compuesto por la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre, la criosfera (cubiertas de hielo) y la biósfera. En términos simples, el clima de la tierra es el resultado de los intercambios e interacciones que suceden entre esas componentes.

2 En matemáticas aplicadas, la discretización es el proceso de transferir funciones continuas a contrapartes discretas. En general se lleva a cabo para lograr que esos procesos sean adecuados para la evaluación numérica y la implementación en computadoras digitales.

realiza tanto en sentido horizontal como en sentido vertical (niveles verticales). Se tiene así una rejilla que en esencia es tridimensional.

Al incrementar la resolución se aumenta el número de puntos donde se realizan los cálculos, de esta manera también se incrementa la cantidad de instantes de tiempo Δt para resolverlos. Existe una relación entre Δx y Δt para asegurar la estabilidad del método, donde un mayor valor de Δx se asocia con un mayor valor de Δt . Si no se asegura la estabilidad del método, se producen resultados que se alejan de la realidad y en muchos casos, la ejecución del programa se detiene. Con esto claro que la resolución es dependiente de los recursos computacionales disponibles. Se trata entonces de tener la mayor resolución posible y obtener resultados en un plazo de tiempo aceptable.

Otra consideración importante que limita el incremento de la resolución se relaciona con el conocimiento de cómo funcionan los procesos en esas cuadrículas cada vez que se hacen más pequeñas. Si el conocimiento es limitado (como muchas veces lo es en la actualidad) para poder representar procesos claves que ocurren en esa dimensión o en dimensiones menores, entonces ¿Cómo incrementar la resolución espacial con esa limitación?

Para incorporar esos procesos que resultan claves y que ocurren en escalas menores a la resolución del modelo, se utilizan métodos que son aproximaciones y que emplean diferentes algoritmos. A esos algoritmos se les denomina “parametrizaciones”³. La incorporación de las parametrizaciones en los modelos tiende a incrementar la cantidad de cálculos a realizar y es otro elemento que se relaciona con la capacidad computacional disponible.

Si todo el conocimiento que existe sobre el sistema climático pudiera ser incorporado completamente, el modelo sería muy complejo para ejecutarlo en cualquiera de las computadoras existentes. Por esta razón y debido razones prácticas, se realizan simplificaciones para reducir complejidad, aumentar la eficiencia computacional y responder de forma eficiente interrogantes de diferentes características. Se crea

³ *Un ejemplo de procesos que ocurriendo en escalas pequeñas, tienen un impacto notable en el clima global son aquellos relacionados con la formación y desarrollo de las nubes. El papel de las nubes en el balance de radiación del Sistema es notable, por eso no se pueden desestimar. Las diversas formas de parametrización que existen y que se emplean es una causa importante para explicar las diferencias en los resultados de los diferentes modelos y en los errores que poseen. En una de las causas de las incertidumbres. En el desarrollo de las parametrizaciones a veces se emplean relaciones estadísticas, que son las responsables de decidir los valores de los parámetros. Es por ello que se dice que los modelos climáticos no están libres de los métodos estadísticos.*

entonces un **espectro de modelos** con diferente nivel de complejidad y aplicabilidad. En sentido general, el espectro está integrado por:

1. *Modelos climáticos tridimensionales océano-atmósfera* (Figura 1): Son los de mayor complejidad pues integran o acoplan: i) modelos de circulación general de la atmósfera; ii) modelos de circulación general del océano, iii) modelos de hielos marinos, iv) modelos de procesos de la superficie terrestre. Por lo general, la resolución espacial de estos modelos es del orden de los 200 a 300 km², aunque en años recientes se ha reducido notablemente (cerca de 100 km² y a veces menores). Estos modelos son los que ofrecen toda la información posible sobre el clima, tanto a nivel horizontal como vertical (en la atmósfera y los océanos);
2. *Modelos climáticos simples* (Figura 2): Modelos simplificados con reducida complejidad. Aquí el número de dimensiones se reduce al máximo y puede llegar a que todo el Sistema se represente en una sola cuadrícula. Los resultados de estos modelos se reflejan solamente como medias globales de temperatura en superficie e incremento del nivel del mar;
3. *Modelos del sistema terrestre de complejidad intermedia*: Se diseñaron como variante intermedia entre los modelos tridimensionales y los modelos simples. Estos modelos describen muchos de los procesos que están implícitos en los modelos complejos, pero en una forma más simple. Como son computacionalmente más eficientes que los modelos complejos, se utilizan para realizar simulaciones para largos períodos donde el nivel de detalle es mucho mayor que el de los modelos simples, pero significativamente menor que en el caso de los complejos;
4. *Modelos climáticos regionales*: En general son similares a los modelos complejos, en lo que se refiere a su estructura interna. Sin embargo, se implementan solamente para una región geográfica limitada con una resolución espacial sustancialmente más alta (p. ej. de 10 a 50 km²). Como el área en que se aplican es una región limitada, estos modelos tienen que ser “alimentados” por sus fronteras laterales y por las superficiales, a partir de las salidas de modelos globales o también de observaciones (ver Figura 3 para apreciar una representación esquemática). Es decir, los modelos regionales no son autosuficientes, ellos son como una lupa que magnifica los resultados de los modelos globales.

Aunque los *modelos climáticos tridimensionales océano-atmósfera* son la mejor herramienta para representar los procesos que ocurren en el sistema climático, las limitantes que imponen los recursos computacionales, restringen su empleo en el examen de un rango amplio diferentes procesos⁴.

La simplicidad de los *modelos climáticos simples* los convierte entonces en una herramienta más eficiente para evaluar, por ejemplo, cuáles serían los niveles de respuesta del sistema climático para diferentes procesos y condicionantes (p. ej. diferentes perfiles de emisiones de gases de efecto invernadero). A diferencia de los modelos complejos, los resultados de los modelos simples no reflejan variaciones espaciales, pues se obtienen como medias globales.

No existe un tipo único de modelo climático. El sistema jerárquico de modelos se refiere al que “organiza” estas herramientas en función de su complejidad, su uso y su eficiencia para responder interrogantes diferentes.

Queda claro entonces que existen modelos climáticos de diferente grado de complejidad y que se usan para dar respuestas diferentes, más o menos complejas, de una forma más eficiente desde el punto de vista computacional y práctico. Por ejemplo, si la pregunta sobre la mesa es ¿En qué momento se

producirá un incremento de 1.5°C o de 2.0°C en la temperatura media global respecto a los niveles preindustriales⁵? La respuesta podría ser encontrada fácilmente y más rápidamente (minutos) con un modelo climático simple. Si por el contrario, lo que se requiere saber es cómo será el clima en la región de América del Norte, cuando la temperatura media global llegue a 1.5, entonces, es necesario un modelo climático tridimensional. Finalmente, si queremos saber detalles de qué pasará en Cuba, entonces bien pudiera utilizarse un modelo climático regional, alimentado por un modelo tridimensional. En resumen, diferentes interrogantes, diferentes modelos.

⁴ Empleando una supercomputadora NEC SX-6, el modelo del Centro Hadley de Inglaterra, por ejemplo, realiza la simulación del clima para un período de 250 años en un plazo de aproximadamente 3 meses. El código de programa de ese modelo puede tener más de mil líneas y los resultados generados actualmente significan unos 300 terabytes (millón de millones de bytes) de datos para su posterior análisis. Se estima que cada año, el volumen de información obtenida se duplica.

⁵ Los niveles que existían antes de la revolución industrial

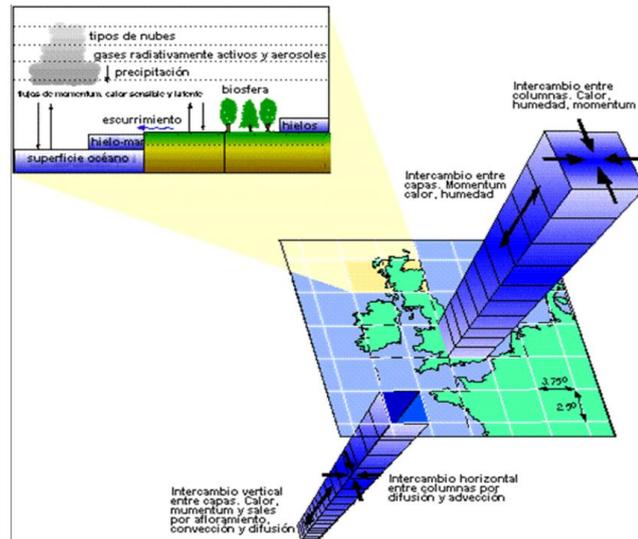


Figura 1. Representación esquemática de la estructura de un modelo tridimensional océano-atmósfera. Para cada punto de rejilla (se consideran también los niveles) el modelo resuelve las ecuaciones físicas mediante las cuales se representan los intercambios (calor, humedad, momentum, etc) que suceden en la atmósfera y los océanos.

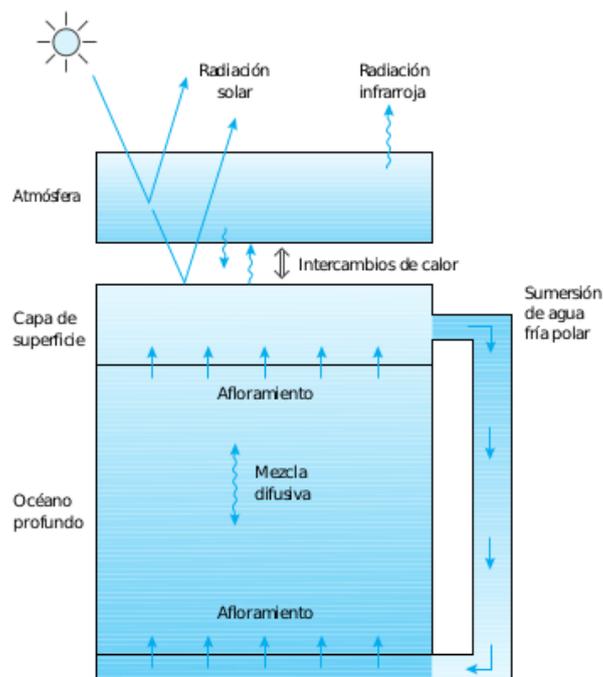


Figura 2. Ilustración esquemática de un modelo climático simple (difusión-afloramiento). Se representan las transferencias de radiación y los intercambios de calor aire-mar y el océano profundo. La atmósfera, la superficie (aire-tierra- océano) y

el océano profundo, son tratados como cajas que interactúan e intercambian magnitudes físicas.

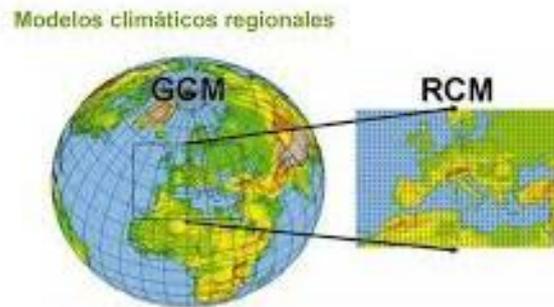


Figura 3. Representación esquemática y simplificada de la relación del modelo global (GCM) con el modelo regional (RCM)

¿Cómo se verifican los modelos climáticos?

En palabras muy simples el desarrollo de la verificación o validación se ejecuta comparando críticamente los resultados del modelo con la información de las observaciones disponibles. Esto ayuda a orientar el trabajo de los investigadores que desarrollan los modelos, toda vez que les ofrece información sobre aquellos aspectos que resultan mejor representados, los que no son apropiadamente reflejados o de aquellos que resulta imprescindible modificar o cambiar.

En este punto se puede utilizar un ejemplo de validación que tuvo un impacto de gran importancia global. Es una muestra muy clara, que demuestra que el uso de la verificación está limitado por el alcance de la pregunta que se quiere responder. Recuérdese que hace algunos años mucho tenían dudas sobre el efecto real

La verificación es práctica científica obligada. Se comparan los resultados de los modelos con las observaciones. Es, sin embargo, un ejercicio científico complejo donde no existe una mejor o única metodología.

del incremento de las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero sobre la temperatura global. Entonces el Cuarto Informe de Evaluación Científica del IPCC demostró la existencia de una señal humana discernible sobre el clima global, utilizando una ilustración muy descriptiva. La Figura 4 es aquella ilustración y presenta los resultados de un conjunto de modelos tridimensionales al simular la temperatura media

global del aire, considerando, por un lado el forzamiento natural, y por el otro el efecto conjunto de los Gases de Efecto Invernadero más el forzamiento natural.

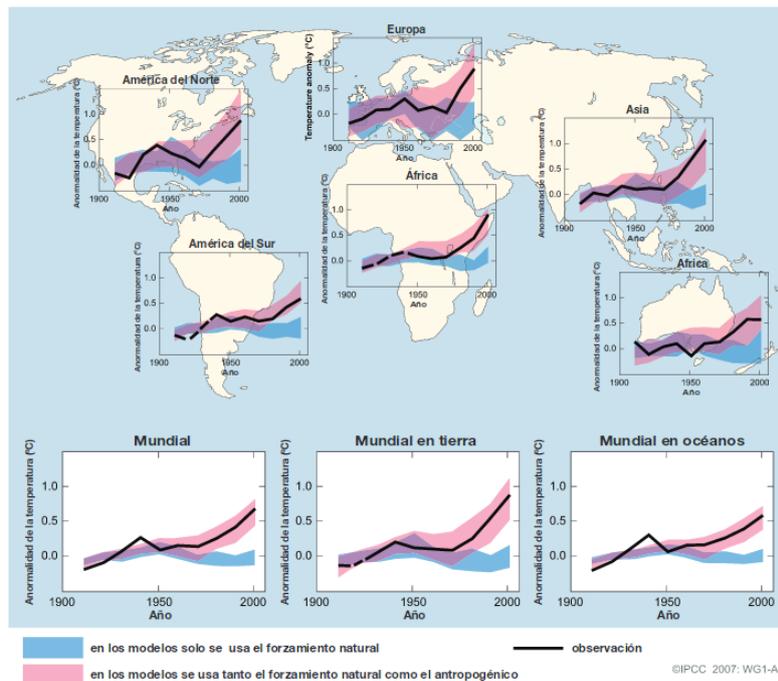


Figura 4. Comparación de los cambios observados a escala continental y mundial en la temperatura superficial producidos por los modelos usando forzamientos naturales y antropogénicos. Fuente 5^{to} Informe de Evaluación Científica del IPCC.

¿Cómo se usan los modelos climáticos para predecir el futuro?

La proyección del cambio climático utilizando los modelos climáticos puede ser explicada de manera simple, siguiendo las etapas que se reflejan en la Figura 5. La primera etapa (que no se incluye explícitamente dentro de los modelos climáticos), consiste en estimar los posibles perfiles de emisiones futuras de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y otros compuestos. Los perfiles de emisiones de GEI, también

Prestemos mucha atención a esta sección. Es clave para comprender cómo utilizar los datos que generan los modelos. También es crucial para empezar a comprender el origen de las incertidumbres en la proyección del clima futuro.

denominados escenarios de emisiones, son deducidos con modelos independientes que toman en consideración el crecimiento poblacional, el empleo de la energía, el desarrollo tecnológico, etc. El IPCC desarrolló un conjunto de escenarios de emisiones denominados comúnmente como SRES

(por las siglas en inglés, Special Report on Emission Scenarios). Existen cuatro familias

denominadas A1, B1, A2 y B2, cada una de las cuales agrupa un conjunto de escenarios que siguen narrativas comunes. Con posterioridad se desarrolló otro grupo de escenarios (esta vez no fueron creados por el IPCC, sino por equipos de investigación independientes) que se denominaron “Trayectorias Representativas de Concentraciones” (RCP, por sus siglas en inglés). Los RCP se tratan en términos de forzamiento radiativo⁶, existiendo también 4 escenarios representativos (RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 y RCP2.6) que son sólo muestras de todo el rango de escenarios publicados. Con estos últimos escenarios la comparación entre los resultados de los modelos es más precisa que cuando se realizaba con otros escenarios.

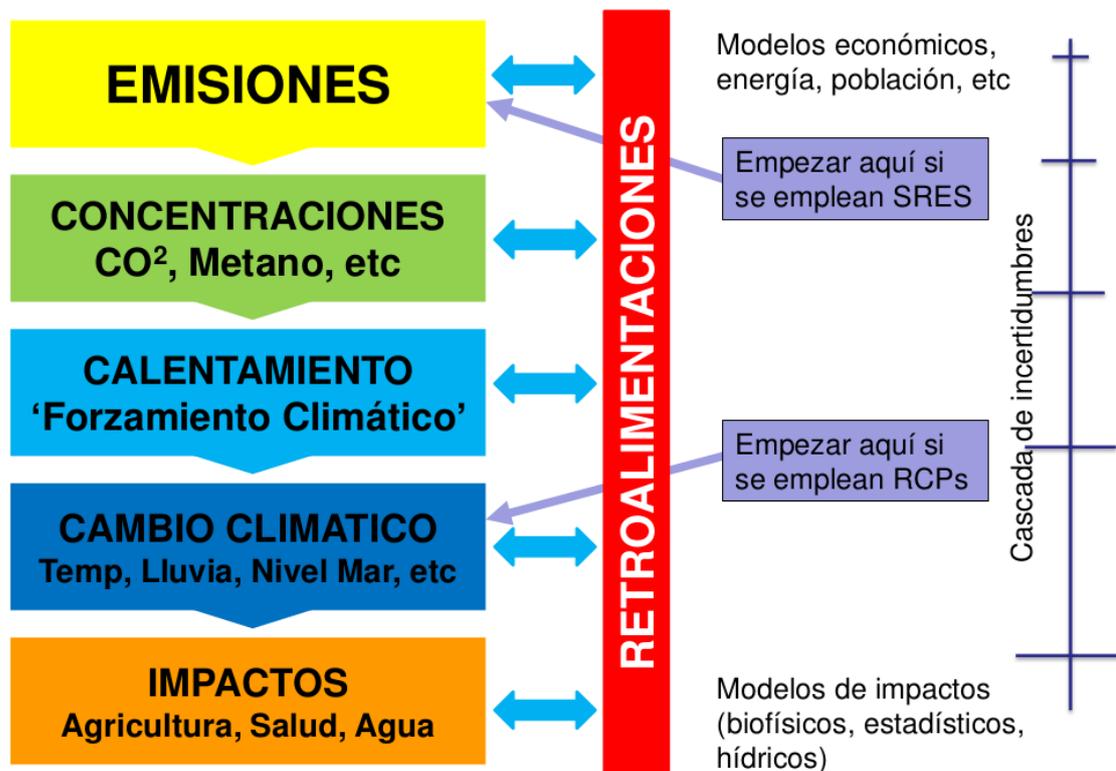


Figura 5. Representación esquemática de las etapas para la predicción del cambio climático. *Fuente del original: Hadley Center for Climate Prediction*

A partir de los escenarios y empleando modelos de ciclos de vida de los gases en la atmósfera se estiman las concentraciones atmosféricas, es decir, la cantidad de gases de efecto invernadero que queda en la atmósfera. Posteriormente, con el empleo de modelos de transferencia radiativa, se utilizan las concentraciones estimadas para determinar el forzamiento o “efecto de calentamiento”. Por simplicidad, en muchas

⁶ Diferencia entre la cantidad de radiación solar y la radiación emitida por la tierra. Se estima en el tope de la atmósfera y si es positivo indica que hay calentamiento de la tierra.

ocasiones se utilizan magnitudes de CO₂-equivalente⁷ para representar el efecto de todos los gases. Finalmente, se estima el efecto del mayor calentamiento sobre el clima. Todos estos pasos eran válidos para escenarios como los SRES o anteriores. Si se usan los RCPs, esta tarea no es necesaria, toda vez que los mismos ya refieren a un forzamiento radiativo determinado (8.5, 6.0, 4.5 y 2.6 Wm²).

Es importante mencionar que los mecanismos de retroalimentación complican este simplificado panorama. Por ejemplo, el calentamiento adicional del sistema climático (forzamiento radiativo) para un doble de la concentración de CO₂ sería de unos 3.8 Wm⁻². En términos simples, tal forzamiento produciría un incremento de la temperatura media global del orden de 1°C. Sin embargo, una vez que el cambio se produce y la temperatura aumenta, se inician una serie de procesos a los cuales se les denomina retroalimentaciones. Por un lado las retroalimentaciones tienden a reforzar el cambio inicial (retroalimentación positiva) o a debilitar el mismo (retroalimentación negativa).

Por ejemplo, el calentamiento de la atmósfera, posibilita que esta pueda contener más vapor de agua y como el vapor de agua es un gas de efecto invernadero muy potente, entonces su mayor concentración incrementa el calentamiento inicial. Por otro lado, un incremento de la concentración de CO₂ aumenta la velocidad de crecimiento de las plantas (efecto de fertilización por incremento de la fotosíntesis) las que a su vez absorben más CO₂, actuando entonces como una retroalimentación negativa. La existencia combinada de estas retroalimentaciones debe representarse en los modelos y como no existe una comprensión completa de las mismas, entonces se convierte en una de las fuentes de incertidumbres más importantes.

Una vez que se tiene el forzamiento climático o forzamiento radiativo, se puede estimar el cambio climático empleando diferentes modelos (tridimensionales, simples, etc) y así se obtienen los cambios de temperatura, lluvia, nivel del mar, etc. Estos son los valores que entonces se emplean en los estudios de evaluación de impactos. Nótese que a medida que se recorren las diferentes etapas las incertidumbres crecen. Además, las mismas no están únicamente asociadas a lo que pasa con los modelos climáticos propiamente, sino a lo que sucede en los escenarios de emisiones o en la diversidad de métodos y modelos de impactos.

⁷ Concentración de CO₂ que posee el mismo forzamiento radiativo que el de una mezcla de gases de efecto invernadero (CO₂ y otros gases de efecto invernadero)

En este punto del documento, luego de haber descrito cómo utilizar los modelos en la proyección del clima, vienen a la mente preguntas que muchas personas hacen con frecuencia. Por ejemplo dos interrogantes muy relacionadas pueden ser:

¿Cuán diferentes son los modelos de pronóstico del tiempo y los modelos climáticos? o si no se puede predecir el tiempo del mes que viene, ¿cómo se puede predecir el clima del próximo decenio?

El tiempo y el clima están muy relacionados pero no son lo mismo. “El clima es lo que yo espero, mientras que el tiempo es lo que tenemos” (Mark Twain)

En primer lugar, las respuestas están estrechamente relacionadas con las definiciones de tiempo y clima. Ambos conceptos, aunque muy relacionados, son cosas diferentes. El tiempo se define como el estado atmosférico en un

momento y lugar dados, que puede variar de una hora a otra y de un día a otro. El clima, en cambio, se refiere generalmente a las estadísticas de las condiciones meteorológicas durante un decenio o un período más largo. Lógicamente entonces, los modelos de pronóstico deben producir información diferente a la de los modelos climáticos, sobre la base, incluso, de condiciones iniciales que también son diferentes. ¿Lloverá o no mañana? es una pregunta que sólo pueden responder los modelos de pronóstico. Para estos modelos, por ejemplo, no interesa mucho o nada la información sobre las variaciones de la temperatura del mar. Sucede que esas variaciones son tan lentas que llegan a ser mayores que las 24 horas (plazo del pronóstico). Así otras componentes que son “lentas” tampoco se consideran. Lo otro necesario aclarar es que los modelos de pronóstico no pueden generar información más allá de una semana. Las más mínimas variaciones en las condiciones iniciales, suelen producir resultados muy diferentes en el pronóstico. Esto es conocido como “efecto mariposa”. Se invita al lector a buscar más información sobre este efecto que se relaciona con la naturaleza caótica de la atmósfera.

A diferencia de lo anterior, para los modelos climáticos esas componentes son imprescindibles, mientras que las “rápidas” resultan despreciables. También se debe aclarar que para los modelos climáticos son más importantes las condiciones de contorno que las condiciones iniciales. Sobre este tema no se profundizará en un texto como este.

Los modelos de tiempo y clima son diferentes, aunque se basan en los mismos principios y formulaciones físicas. No se puede pedir la misma respuesta a ambos.

Un ejemplo gráfico que puede ayudar a ilustrar para qué están preparados o no los modelos climáticos, se puede apreciar en la Figura 6. Ahí se muestra la marcha anual de los totales de precipitación en un pluviómetro de la red del INRH⁸. Se muestran la marcha de años individuales junto a la de la media de todos esos años. Entonces, se puede afirmar que los modelos climáticos no están preparados para brindar información futura válida y útil de meses y años específicos como los mostrados en la figura (nótese la variabilidad entre los diferentes años)⁹. Sin embargo, estos modelos sí fueron desarrollados para producir resultados plausibles sobre condiciones medias, como la que aparece en la línea roja más gruesa.

Un ejemplo menos académico quizá pueda terminar por ilustrar este asunto es el que a veces utilizamos en alguna que otra conferencia. Decimos que nuestra pregunta clave sería similar a preguntarse, ¿cómo es posible que se pueda expresar cuál es la esperanza de vida de los cubanos y no se pueda decir lo mismo a nivel individual? Pensemos; la esperanza de vida individual es el tiempo y no lo podemos predecir con tanta antelación. Sin embargo, la esperanza de vida de los cubanos se basa en la estadística con muestras grandes, como ocurre en el caso del clima.

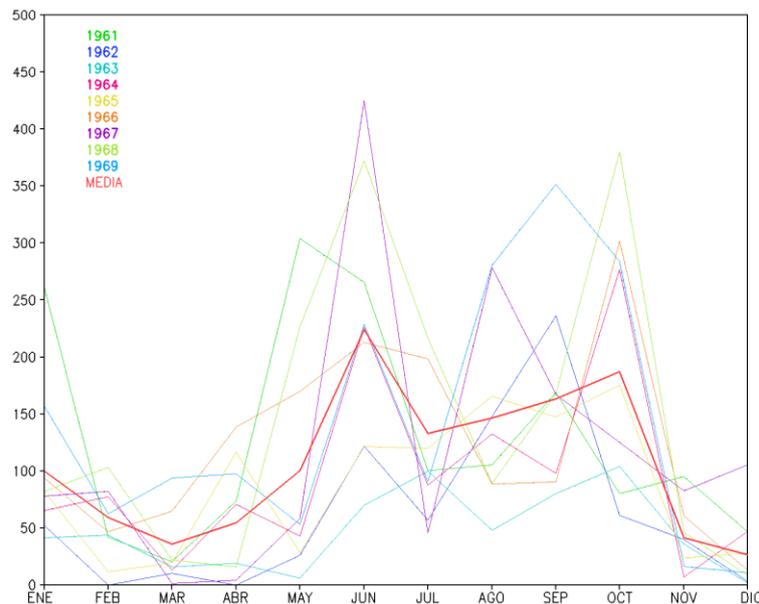


Figura 6. Marcha anual de los valores de precipitación (mm) para cada uno de los años referidos en la parte superior izquierda. La línea roja corresponde la media de todos los años (climatología).

8 Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Cuba.

9 Obviamente producen la información, sólo que la misma no debe ser interpretada en términos específicos de años o meses individuales.

Una última pregunta que a veces genera grandes dudas en aquellos que deben interpretar los resultados de los modelos climáticos y producir una nueva información para la toma de decisiones es:

¿Por qué existe incertidumbre en la estimación del clima futuro?

Recuérdese lo explicado cuando se habló de cómo se usan los modelos climáticos. Veremos que en las diferentes etapas hay aspectos que generan incertidumbres (ver cómo en la Figura 4 las barras de la cascada de incertidumbre aumentan). Desde que se inicia el proceso hay incertidumbres claras en los escenarios de emisiones/concentraciones. En todo caso se han desarrollado familias de escenarios y no escenarios particulares. El desarrollo futuro de la humana es particularmente incierto y ello se trasmite a lo que ingresa en los modelos climáticos.

No esquivemos las incertidumbres. Incorporemos todos los elementos relacionados con ellas y hagamos más robustas las conclusiones y recomendaciones.

Pero bueno, en este texto se hablará sólo de los elementos relacionados con los modelos climáticos en sí. Lo primero es que dos modelos diferentes pueden fácilmente producir resultados diferentes, pues pueden tener estructuras diferentes

(p. ej. rejillas diferentes) o esquemas de parametrizaciones también diferentes. Eso se puede resumir, como que cada uno tiene configuraciones diferentes. Resulta que cada uno de esos modelos ha sido desarrollado y validado de manera independiente y cada uno es la mejor variante desarrollada. Por ello se estaría utilizando lo que individualmente es mejor, pero que resulta diferente cuando se comparan. ¿Alguno es mejor que otro? En principio se puede decir que no. Están basados en los mismos principios físicos válidos, por tanto, no hay debilidades conceptuales básicas. Existen procesos rigurosamente científicos donde esos modelos se intercomparan y donde los mismos deben mostrar niveles de habilidad determinados¹⁰.

Como se tendrían 2, 3 o un número superior a 20 de modelos diferentes, entonces la pregunta es cuál o cuáles utilizar. La respuesta no es tan simple o tan directa como podría pensarse. Por lo general, se determina utilizar tantos modelos como “buenos modelos” se tengan. Aquellos “buenos modelos” que mejores resultados puedan ofrecer para lo que se vaya a analizar. La idea de utilizar el mayor número posible, es porque se quiere reflejar la incertidumbre (existe y es inevitable) en lugar de esquivarla o pretender que no existe. Es una mala estrategia esquivar o eliminar la incertidumbre

¹⁰ Hasta la fecha se han desarrollado 5 versiones de lo que se conoce como Programa de Intercomparación de Modelos Climáticos. El último conocido fue el CMIP5.

cuando se informa a los tomadores de decisiones. Piénsese bien, ¿qué sucedería si informamos a los decisores utilizando los resultados de un sólo modelo, indicando que es la opción más mala o la mejor? Se induciría, sin dudas, una decisión sesgada por la limitada o también sesgada información que se posee. En lugar de ello, se debería indicar que los modelos coinciden en tal cosa, no coinciden en otra y tienen otros niveles de coincidencia en otras. Hacer eso es misión de los científicos; entender eso es cosa de los decisores, pero con el apoyo de los científicos. Ilústrese todo con una pregunta que puede servir de ejemplo. ¿Es apropiado decir que el incremento del nivel del mar para un país X en dos momentos futuro será de 65 mm y de 100 mm, respectivamente? En realidad no lo es. Se debería informar que esos pueden ser los valores promedios de muchas simulaciones e indicar al mismo tiempo, la amplitud o rango de las mismas. Eso permitiría indicar que, si el rango es pequeño alrededor de ese promedio, quizá sea muestra de una incertidumbre menor.

Uso de los modelos climáticos en Cuba. Una experiencia de trascendencia nacional y regional.

Para hablar de las experiencias de la modelación climática en Cuba se puede tratar de responder el siguiente par de preguntas: **¿para qué se utilizan de forma sistemática los modelos climáticos en Cuba?** y **¿Cómo se ha avanzado en el uso de los modelos climáticos disponibles?**

En el caso de la primera la respuesta más simple es; para **informar** cómo será el clima de Cuba y en la región del Caribe en el futuro. Para que los datos de los modelos climáticos asimilados o considerados estén disponibles para estudios de evaluación de impactos. Para que los resultados de esos estudios sirvan para **informar** a los decisores. Para que esa información sea relevante y utilizada por todos los que hoy dibujan las acciones a ejecutar dentro del Programa de Estado conocido como “Tarea Vida”. **Informar** sobre el clima futuro de Cuba incluye llamar la atención de que puede ser que no en todos los lugares del país cambiará de igual forma o magnitud. Es informar que esas diferencias requieren respuestas o acciones diferentes. Es **informar** para ayudar a guiar el proceso.

Responder la segunda pregunta motiva a hacer una historia que quizás sea interesante y que ha sido documentada con artículos publicados en revistas internacionales. A continuación se narra brevemente.

A inicios de los años 2000, específicamente en el 2003, un grupo de científicos de la región del Caribe se unió en torno a la idea de emplear los modelos climáticos en la región con vistas a **informar**. Fue así que nació el embrión de lo que hoy se ha consolidado como el Consorcio de Modelación Climática del Caribe (CMCC). En aquel entonces, el Centro de Cambio Climático de la Comunidad del Caribe, el Instituto de Meteorología de Cuba, los campos de Mona y Cave Hill de la Universidad de las Indias Occidentales, apoyados por el Programa de Naciones Unidas en un inicio, se reunieron en Cuba para asimilar el Modelo Climático Regional (MCR) PRECIS. Paralelamente los científicos cubanos daban pasos sólidos para asimilar y utilizar otros MRC.

El nacimiento y progreso del CMCC permitió compartir éxitos y frustraciones en esta compleja actividad científica dentro de la región. Quizá lo más importante es que permitió tener más científicos trabajando de manera paralela y coordinada en diversas aristas de la modelación del clima en la región. El beneficio ha sido común para todos, incluyendo aquellos países que no tienen presencia directa en el CMCC. En todo este desarrollo se han utilizado diferentes tipos de modelos en dependencia del grado de desarrollo que se ha alcanzado. En los inicios (años previos o cercanos al 2000) se usaron los modelos climáticos simples, los cuales sólo podían ofrecer información general, pero podían ser utilizados con recursos computacionales muy poco costosos (i. e. computadoras personales), que eran los disponibles por entonces.

En momentos posteriores se inició la asimilación y empleo de los MCR utilizando, como es requisito, la información de entrada proveniente de los MCG. La participación de científicos de la región permitió compartir los recursos humanos y computacionales para hacer posible ese esfuerzo coordinado.

Los resultados iniciales permitieron documentar e **informar** sobre el clima futuro de la región a partir del MCR PRECIS “alimentado¹¹” por los modelos climáticos globales ECHAM4 y HadAM3P. Así se lograba incrementar la resolución espacial de los resultados desde cerca de 150x150 km (de los MCG) a 50x50 km (del MCR). Estos primeros resultados indicaban que el clima de la región del Caribe sería mucho más cálido, con una reducción notable de las precipitaciones en buena parte de la misma

La ciencia de la modelación del cambio climático se ha desarrollado para informar. Su historia es bastante reciente, pero la magnitud e impacto de los resultados son significativos.

¹¹ Recordar que la información de los MCG es pasada a los MCR por sus bordes. El MCG alimenta así al MCR.

(Figura 7). Se puede apreciar, sin embargo, que no es un patrón generalizado y que existen países donde esa conclusión no es válida. A esto se refiere el valor añadido de los MCR, que permiten brindar mayores detalles que los MCG.

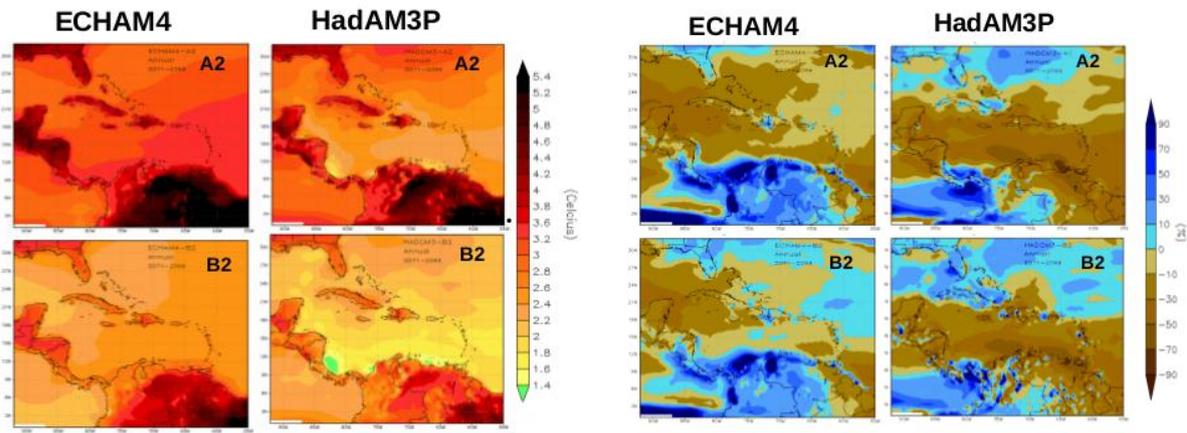


Figura 7. Distribución espacial de los cambios futuros de la temperatura en °C (bloque izquierdo) y de la precipitación en % (bloque derecho) para el período 2071-2099. A2 y B2 se refiere a los escenarios SRESA2 y SRESB2, respectivamente. *Fuente: Centella A., A. Bezanilla y K. Leslie (2007): A study of the uncertainty in future Caribbean climate using the PRECIS regional climate model. Technical Report of the Community Caribbean Climate Change Center, Belmopan, Belize.*

Estos resultados permitieron, entre otras cosas, ofrecer **información** relevante al proceso de preparación de la Segunda Comunicación Nacional de Cuba. También fue la **información** empleada en el estudio de impactos del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba, preparado bajo la guía científica del Instituto de Meteorología.

Con posterioridad el Consorcio de modelación ha continuado trabajando de manera sistemática para actualizar los resultados con nuevas salidas de modelos globales. Actualmente se ha producido una gran cantidad de información que está siendo analizada y procesada. En sentido muy general la nueva información confirma algunos de los resultados alcanzados anteriormente y precisa donde los resultados del promedio de muchos modelos es más o menos robusto (ver Figura 8).

La Figura 8 se puede destacar como un ejemplo para ilustrar el tema de la incertidumbre. En la parte superior se aprecian (principalmente en la precipitación) las diferencias que pueden existir entre los diferentes modelos. Informar ese resultado así puede ser difícil; comprenderlo mucho más. Sin embargo, en la parte inferior los cambios de precipitación se calcularon a partir de la media de muchos modelos. Entonces se adicionaron elementos de coincidencia y significación estadística. Así, se llegan a representar las áreas donde existe mayor/menor robustez (mayor

confianza/menor) en los resultados (aquellas áreas donde existe mayor/menor coincidencia y significación estadística). Nótese que mientras se avanza hacia el futuro la robustez se incrementa en muchas zonas de la región.

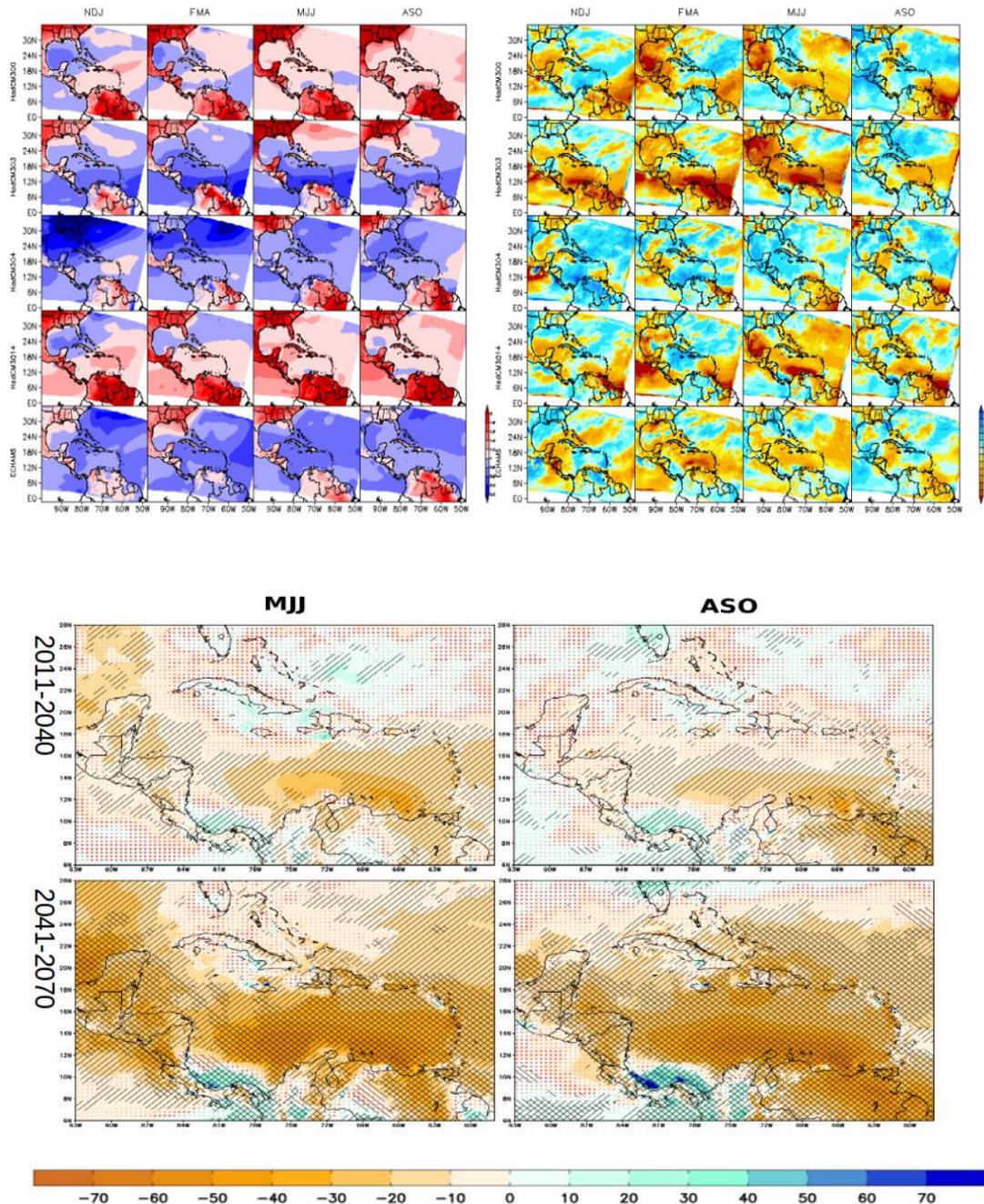


Figura 8. En la fila superior se muestran los cambios futuros de la temperatura en $^{\circ}\text{C}$ y la precipitación en % por trimestres para el período 2041-2070. Se utilizó un grupo de nuevos modelos bajo el escenario SRESA1B. En la fila inferior aparece el cambio de la precipitación en % basado en la media de 11 modelos nuevos. Donde aparece / significa que el 60% de los modelos coincide en la dirección de la señal de cambio. Donde aparece \ se indica que los cambios son significativos estadísticamente. Se puede entonces apreciar donde los cambios son robustos.

El impacto de la modelación del cambio climático en Cuba y la región del Caribe ha sobrepasado el interés puramente científico. Ha contribuido también a responder interrogantes de interés social y político.

Otros resultados relacionados con los esfuerzos que se realizan en el campo de la modelación del cambio climático se relacionan con la capacidad de la región para **informar** sobre las implicaciones que tiene el acuerdo de París. Recuérdese que el Acuerdo trata de mantener la temperatura media global (TMG) muy por

debajo de 2.0°C respecto a los preindustriales y exhorta a hacer esfuerzos para que sea menos a 1.5°C. Pues bien, científicos de la región realizaron una investigación donde se concluyó que:

- El valor de 1.5°C de la TMG se alcanza tan temprano como a finales de los 2020s, mientras que el 2.0°C sucede en la parte temprana de los 2050s;
- Que mantener el valor de 1.5°C de la TMG es cuestión de necesidad. Los cambios serán más significativos mientras mayor sea el calentamiento. Si aumenta de 1.5°C a 2.0°C, entonces en el Caribe existirán incrementos significativos en la temperatura, en el número de períodos cálidos, en la cantidad de días secos y cálidos y en la seguía la sequía. Mientras tanto, se reducirán las precipitaciones y la cantidad de días con lluvias intensas;
- 1.5°C no está exento de desafíos. La región estaría en un estado climático arriesgado o en el reino de lo poco conocido. Si el calentamiento es superior, se puede llegar a estar en un ámbito de condiciones climáticas sin precedentes.

La región del Caribe ha otorgado especial atención a estas investigaciones dentro del proceso de negociación en el marco de la Convención de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. También ha tenido un impacto importante dentro de la comunidad científica y el IPCC. Así, en el informe especial que prepara el IPCC sobre el 1.5°C, los resultados del Caribe son de los pocos estudios realizados y documentados en zonas de pequeños estados insulares.

Existen muchas, muchas otras muestras de los avances que se han producido en el Caribe y Cuba en la modelación del cambio climático. También existen notables aportes en el terreno de la modelación del pronóstico del tiempo, no sólo de la atmósfera, sino del océano. Creemos que otros autores, podrían imitar esta iniciativa y documentar ese tema de igual complejidad. Se les invita a hacerlo.

A manera de Epílogo

Se ha tratado de divulgar varios aspectos de un tema muy apasionante desde el punto de vista científico. Un tema bastante complicado de describirlo con un lenguaje que esté al alcance de una mayoría de personas. Ojalá que los que lean este documento realicen muchas preguntas. Esto significaría que entendieron muchas cosas y tienen interés o preocupación por otras.

Para terminar se pueden resumir algunas ideas que parecen importantes e interesantes. Hay algunas que son preocupaciones desde el punto de vista científico y que es bueno compartirla con los lectores. La primera idea es que al tema de la modelación no se le debe temer. Es complejo, pero puede llegar a comprenderse, al menos para emplear correctamente la información que los modelos producen. Tomar otra posición limitaría los resultados y los efectos de nuestros mensajes.

Otra idea se relaciona con el necesario aporte que los resultados pueden tener en diferentes acciones que se desarrollan en Cuba. Por mucho tiempo se escucha “estamos trabajando para identificar la forma de enfrentar el cambio climático”. Eso es lícito, correcto, necesario e importante. No obstante es un discurso muy general. Se percibe que se reconoce el cambio climático, pero no se toma en cuenta qué aspectos del cambio climático son los importantes y dónde lo son. Por ejemplo, si se va a identificar qué hacer para adaptarnos, debemos definir con precisión ¿Adaptarnos a qué? ¿Adaptarnos dónde? ¿Adaptarnos cuándo? Para todas esas preguntas los esfuerzos y resultados de la modelación pueden ser claves.

La modelación del tiempo y el clima merecen un mayor apoyo para que su desarrollo continúe hacia adelante. Los recursos computacionales necesarios deben continuar mejorándose, la ciencia asociada a esta tarea debe seguir priorizándose y los recursos humanos necesarios deben continuar preparándose. Pensar que con lo que se ha avanzado y con lo que hoy se posee, se asegura un desarrollo, es una ilusión totalmente injustificada.

Agradecimientos

En el proceso de preparación de este libro ha sido crucial el apoyo recibido del Proyecto “Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático”. También es preciso reconocer al Proyecto de Investigación “Suporte Unificado de Proyecciones para Estudios Regionales del Cambio Climático”, dado que muchos de los resultados y figuras empleados en el documento provienen del mismo. Ambos proyectos son dirigidos por

el Instituto de Meteorología y se enmarcan dentro del Programa Nacional de Ciencia y Técnica “El cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”.

Un agradecimiento especial a diferentes personas quienes tuvieron la amabilidad de revisar el texto y hacer comentarios para mejorar el mismo. Entre ellos debo mencionar al Dr. Eduardo Planos, la Ing. Grisel Acosta, la Dra. Cecilia Fonseca, el Dr. Ramón Pérez Suárez,