



GUÍA PARA GENERAR Y APLICAR ESCENARIOS PROBABILÍSTICOS REGIONALES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA TOMA DE DECISIONES

Elaborada por:

Víctor Orlando Magaña Rueda
Centro de Ciencias de la Atmósfera
Universidad Nacional Autónoma de México

ENERO, 2010.

Índice	Pág.
Acrónimos y siglas (en inglés y español)	2
Resumen ejecutivo (español)	3
Resumen ejecutivo (inglés)	5
1. Introducción	7
2. Los Modelos de Circulación General de la Atmósfera	8
3. El concepto de incertidumbre en la proyección del clima	15
4. La generación de escenarios regionales de cambio climático	20
5. La herramienta de predecibilidad del clima (CPT) para la reducción de escala	27
6. Un Generador Estocástico de Tiempo Meteorológico (GETM)	45
7. Ejemplos para la evaluación de impacto y vulnerabilidad	51
8. Conclusiones y recomendaciones	58
9. Bibliografía	60
Anexo 1	62
Anexo 2	70

Acrónimos y siglas (en inglés y español)

CCA	Análisis de correlaciones canónicas
CPT	Climate Predictability Tool
EOFs	Funciones Empíricas Ortogonales
GCMs	Modelos de Circulación General de la Atmósfera
GEI	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero
GETM	Generadores Estocásticos de Tiempo Meteorológico
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
IPCC DDC	IPCC Data Distribution Center
IRI	International Institute for Climate and Society
MOS	Model Output Statistics
PCR	Regresión por componentes principales
PDF	Función de Densidad de Probabilidad
RCM	Modelos de Clima Regional
ROC	Operación del receptor
SDSM	Statistical DownScaling Method
SRES	Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones
TAR	Tercer Informe de Evaluación sobre Cambio Climático

Resumen ejecutivo

De acuerdo al consenso alcanzado por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su Cuarto Informe de Evaluación (IPCC 2007), el futuro del planeta está en riesgo por el cambio climático a menos que se actúe en dos direcciones: la mitigación y la adaptación. La mitigación busca reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) e incrementar los sumideros de carbono, y con ello disminuir el calentamiento del planeta, es decir, reducir la amenaza. Por otro lado, la adaptación busca desarrollar estrategias y acciones para reducir la vulnerabilidad al cambio climático de grupos sociales, regiones o sectores económicos por mencionar algunos, de forma tal que los impactos negativos esperados bajo cambio climático sean menores o eliminados, y se pueda incluso aprovechar las oportunidades asociadas a un nuevo clima.

Los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (GCMs, por sus siglas en inglés) constituyen la herramienta para proyectar el clima. Una de las estrategias que se recomiendan para generar escenarios del clima futuro es trabajar con diversos GCMs, preparando experimentos numéricos que partan de condiciones iniciales ligeramente diferentes entre sí, bajo diversos forzantes radiativos resultado de escenarios de emisiones globales de GEI, para llegar a lo que se conoce como un ensamble multimodelo de cambio climático. Dicho ensamble permite conocer el rango más probable de condiciones futuras del clima a partir de establecer en dónde se encuentra la mayor parte de las soluciones. La dispersión entre experimentos o realizaciones está relacionada con la confianza o incertidumbre en los escenarios de cambio climático y se puede expresar como una Función de Densidad de Probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés). Con una alta dispersión de la PDF de las salidas del modelo, se tiene menos confianza en la proyección que con una baja dispersión.

Para aprovechar los escenarios de cambio climático, es necesario reducir la escala espacial o regionalizar las salidas de los GCMs, no es un proceso de interpolación, pues la incertidumbre en los escenarios aumenta cuando se incrementa la definición espacial. No hay un método estándar para reducir la escala espacial de los escenarios generados con GCMs, pues el procedimiento seleccionado dependerá en gran medida en la situación y datos disponibles. Los escenarios regionales de cambio climático, se pueden obtener a través de técnicas de reducción de escala (*downscaling*) estadísticas y dinámicas. Sin embargo, se debe estar consciente de las limitaciones de cada procedimiento. En las técnicas estadísticas de reducción de escala las variables del clima regional o local (*predictandos*) se obtienen generando un modelo estadístico (función de transferencia) que las relaciona con las variables de gran escala del GCM (*predictores*). El *Climate Predictability Tool* (CPT) es una herramienta de regionalización de salidas de GCM basada en la corrección de errores sistemáticos a través de la identificación de patrones espaciales. Utilizando CPT y las salidas mensuales de diversos GCMs para distintos escenarios de emisiones globales de GEI, se pueden construir escenarios regionales de cambio climático por ensamble multimodelo, de forma más simple que si se utilizan modelos dinámicos de mesoescala. Tener una muestra suficientemente grande de experimentos, es un elemento fundamental en la construcción probabilista de los escenarios del clima futuro, esencial para la gestión de riesgo.

Un escenario regional de cambio climático por ensamble se puede representar usando la mediana de la muestra de los experimentos (realizaciones) y una medida de dispersión (desviación estándar) entre dichas realizaciones para estimar la incertidumbre (Meehl *et al.*, 2007). Esta última puede ser algún rango intercuantil o el rango donde exista el 80% de las realizaciones, dejando 20% en las colas de la distribución que represente los extremos y *outliers*. Los escenarios regionales construidos con CPT son comparables a algunos de los escenarios producidos usando modelos dinámicos de mesoescala, por lo que se logra capturar en buena medida, el efecto de circulaciones regionales que producen en estas escalas espaciales. Para proyectar la actividad de condiciones de tiempo meteorológico severo (e.g., actividad de tormentas u ondas de calor, etc.), a partir de escenarios mensuales de cambio climático, se puede utilizar un generador estocástico de tiempo meteorológico como lo es LARS. El generador estocástico ayuda a estimar la PDF en una estación de por ejemplo, temperatura o precipitación, permitiendo así analizar sus cambios en un planeta más caluroso. Los cambios en la condición media del clima y su variabilidad pueden hacer que los incrementos en temperatura o en precipitación extremas (colas de la PDF) sean mayores que los proyectados para la mediana. Es por esto que el cambio climático podría ser más rápidamente identificable a través de eventos extremos.

El presente manual explica en qué consiste generar escenarios regionales de cambio climático considerando la incertidumbre, explica cómo se pueden utilizar algunas herramientas estadísticas para obtener estimaciones de los rangos de cambio en precipitación y temperatura. Se presentan tres ejemplos de cómo se usan los escenarios regionales de cambio climático para estimar potenciales impactos en sectores y regiones.

Executive Summary

According to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (IPCC 2007), the future of the planet is at risk due to climate change unless we work along two main lines of action: mitigation and adaptation. The mitigation looks for a reduction in Greenhouse Gas Emissions and the rate of warming of the planet that is to say, reducing the hazard. On the other hand, adaptation is aimed at developing strategies and actions to diminish the vulnerability to climate change in regions, social groups or economic sectors at risk, so that the expected negative impacts be smaller or eliminated, and one can even benefit from the opportunities associated with a new climate.

General Circulation Models (GCM) of the Atmosphere constitute the main tool to project climate. One of the strategies that are recommended to generate scenarios of the future climate is to work with various GCMs and to run numerical experiments initialized with slightly different initial conditions under various radiative forcing scenarios to obtain a joint multi-model ensemble of climate change. This ensemble allows estimating the range of the most probable future conditions of climate to establish where the most probable solutions are. The dispersion among experiments or realizations is related to the confidence or uncertainty in the projection of climate and can be expressed as a Probability Density Function (PDF). The higher the dispersion of the PDF of the model realizations, the higher the uncertainty in the projection. In order to take advantage of the climatic change scenarios, it is necessary to reduce the spatial scale with which the projections were originally generated by the GCM. Downscaling, i.e., reducing the spatial scale or regionalizing the GCMs output is not only an interpolation process, because the uncertainty in the projections is larger when the spatial resolution is increased.

There is no standard method to reduce the spatial scale of the scenarios generated with GCMs, because the procedure will depend to a great extent on the situation and data available. The regional scenarios of climate change can be obtained through statistical or dynamical downscaling techniques. Nevertheless, one should be aware of the limitations of each procedure. In the statistical downscaling, the variables of the regional or local climate (predictands) are obtained generating a statistical model (transfer function) that relates them to the large scale variables of the GCM (predictor). The Climate Predictability Tool (CPT) is a GCM output downscaling scheme based on the correction of biases through the identification of spatial patterns. Using the monthly GCM output for various greenhouse gas emissions scenarios, CPT produces regional climate change scenarios that result in a multi-model ensemble in a simple manner than using dynamic mesoscale models. Having a sufficiently large sample of downscaled scenarios is necessary for probabilistic projections of future climate, essential for climate risk management. Regional climate change scenarios may be represented using the sample median of the projections and a measurement of the dispersion among these members to estimate the uncertainty (Meehl *et al.*, 2007). The latter may be an interquantil range or the range where 80% of the realizations occur; leaving 20% in the tails of the distribution that represents the extremes and outliers. The CPT regional climate change scenarios adequately compare with some of the scenarios produced using dynamic mesoscale models. In order to project the activity of severe weather (e.g., heat waves, storms, etc.), from monthly scenarios of climate change, a stochastic weather generator such as LARS may be used. The stochastic weather generator is useful to

construct the PDF for a particular location for example, for temperature or precipitation, allowing analyzing its changes in a warmer planet. The changes in the average condition of climate and its variability may result in larger changes in extreme temperature and precipitation (the tails of the PDF) than for the mean only.

This manual explains the process to generate regional climate change scenarios, the sources of uncertainty and how some statistical tools can be used to obtain estimates of the ranges of change in precipitation and temperature. Three examples on how to use regional climate change scenarios to consider potential impacts in sectors and regions are presented.

1. Introducción

El Cambio Climático debe ser reconocido como un problema de gestión de riesgo, en donde éste, es el resultado de combinar una amenaza y una vulnerabilidad a dicha amenaza (Fig. 1). Cuando el riesgo se materializa ocurre un desastre y por ello se ha tratado de estimar cual es el nivel crítico de riesgo ante cambio climático que podemos tolerar. Algunos sugieren que ese límite se rebasará, si se exceden los 2°C de calentamiento global. México es un país altamente vulnerable a variaciones en el clima; los impactos negativos de sequías o inundaciones, aun siendo parte de la variabilidad natural del clima, se convierten con frecuencia en desastre. Sin embargo, aun es común escuchar que los desastres, mal llamados naturales, son impredecibles y cada vez más frecuentes debido a que “la naturaleza fue impredecible o se puso en nuestra contra”. Recurrir a este paradigma naturalista lleva a que la sociedad juegue un papel pasivo ante un elemento activo como el clima. Las implicaciones de esta visión, hacen que estado y sociedad no asuman las responsabilidades inherentes a toda organización en materia de seguridad, al no reconocer la influencia de los procesos sociales, económicos y políticos en la construcción de la vulnerabilidad.

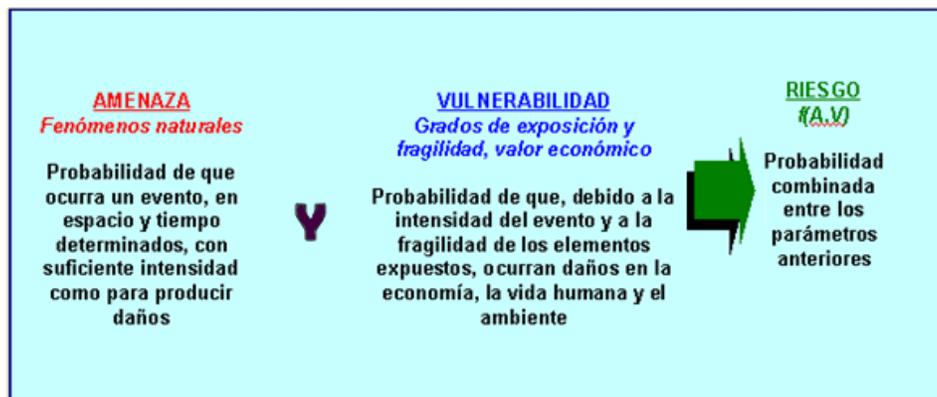


Fig. 1 Diagrama de relaciones entre amenaza, vulnerabilidad y riesgo

Desde hace algunos años, los encargados de la Protección Civil en el mundo realizan esfuerzos por pasar de sistemas reactivos al desastre a esquemas preventivos, pues sin duda la prevención (atendiendo las causas de raíz) es menos costosa y más efectiva que la respuesta a la emergencia o al desastre. La prevención es una estrategia fundamental para el desarrollo sostenible, dado que permite compatibilizar el ecosistema natural y la sociedad que lo ocupa y explota, dosificando y orientando la acción del hombre sobre el medio ambiente y viceversa. Para aprovechar los recursos naturales en forma segura es necesario conocer la amenaza y la vulnerabilidad como elementos dinámicos es decir, en constante cambio. El desafío actual, es lograr cambiar la gestión del riesgo de remediación o emergencista (reactiva) a preventiva (proactiva), reduciendo la corrección de problemas sobre la marcha para consolidar la aplicación de alternativas de acción. Para ello, es necesaria una adecuada evaluación de ventajas, y desventajas de las acciones mediante escenarios de impacto.

Todo mundo habla hoy en día que el clima está cambiando, elevando por lo general el riesgo. Desafortunadamente, la sociedad continúa construyendo condiciones de riesgo ante las condiciones anómalas en el clima, colocándose cada vez más cerca del desastre. Ante esto, la comunidad científica propone a las autoridades y actores clave, desarrollar esquemas que reduzcan la vulnerabilidad replanteándose el tipo de modelo de desarrollo

seguido hasta ahora. El cambio climático está obligando a las comunidades de los países pobres a adaptarse a un impacto sin precedentes. Reducir la probabilidad de desastre e impactos negativos de gran magnitud significa reducir la amenaza y la vulnerabilidad. Aunque es difícil establecer con toda precisión cuáles serán los impactos en regiones, sectores o grupos sociales particulares, es muy probable que el futuro no sea promisorio a menos que se comience a actuar desde ahora para resolver el que se considera el problema ambiental más importante del presente siglo.

De acuerdo al consenso alcanzado por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su Cuarto Informe de Evaluación (IPCC 2007), el futuro del planeta está en riesgo a menos que se actúe de forma conjunta, lo que significa trabajar también en forma regional y local. Por esto, gran parte del discurso de acción para enfrentar el cambio climático, se divide en dos grandes apartados: la mitigación y la adaptación. La mitigación, busca reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y fomentar la conservación e incremento de los sumideros de carbono, logrando reducir su concentración en la atmósfera y con ello disminuir el calentamiento del planeta, es decir reduciendo la amenaza. Por otro lado, la adaptación busca desarrollar estrategias y acciones para disminuir la vulnerabilidad a anomalías climáticas de regiones, grupos sociales o sectores económicos, de forma tal que los impactos negativos proyectados bajo cambio climático sean menores o eliminados, y que incluso se puedan aprovechar las oportunidades asociadas a un nuevo clima. En el fondo, adaptación implica un nuevo tipo de diálogo entre científicos y los tomadores de decisiones, en procesos complejos, así como la construcción de un nuevo modelo de desarrollo. Es necesario acortar el tiempo que toma entender un fenómeno y sus implicaciones o la forma de comunicarlos para diseñar una respuesta social (política pública, creación de instituciones, fondos, programas, normas y sistema de inversión en más ciencia y tecnología). La adaptación implica por tanto el desarrollo de nuevas instituciones y relaciones entre academia y gobierno, entre academia y sociedad.

Para proponer e implementar acciones de adaptación es necesario en primer lugar, estimar los impactos potenciales del cambio climático. Segundo, generar capacidades para la adaptación, y que finalmente, ésta pueda implementarse. El presente manual tiene por objeto, mostrar la forma de generar y aprovechar los escenarios de cambio climático para estimar los posibles impactos de un nuevo clima y así proponer, en conjunto con los actores clave, estrategias para reducir el riesgo de desastre. Es claro que también tiene que ver con generar capacidades, pues un mejor entendimiento del significado de los escenarios de cambio climático ayudará a avanzar en la dirección correcta para reducir el riesgo.

2. Los Modelos de Circulación General de la Atmósfera

¿Qué son?

El hombre ha tratado de explicar el mundo que lo rodea y con base en ello, reducir los peligros que le acechan o beneficiarse de los recursos a su alcance. Pero ¿cómo se puede estudiar y entender algo tan formidablemente complejo como es la biosfera, una selva tropical, o el clima?. Necesariamente, tenemos que usar simplificaciones que tengan en cuenta sólo las propiedades más importantes y básicas de los sistemas. Estas versiones simplificadas de la realidad se llaman modelos, son una descripción aproximada de los fenómenos del mundo real, con el fin de comprenderlos y predecirlos. Un modelo puede ser tan sencillo como una simple explicación con palabras de lo fundamental de

una realidad, hasta una formulación matemática basada en principios y leyes naturales. Un sistema se puede modelar considerando diagramas en los que se dibujan en forma simplificada sus componentes, señalando con flechas las acciones de unos sobre otros. Algunos pueden ser esquemas simples, pero cuando cada flecha indica el tipo de acción que tiene lugar y se señalan diferentes compartimentos y tipos de interacción, pueden llegar a ser muy complicados. Los modelos numéricos representan cuantitativamente, a partir de principios fundamentales, el comportamiento y respuesta de un sistema a determinados forzantes (cantidad de energía solar que llega a la Tierra, anomalías de temperatura de superficie del mar, concentraciones de gases antropogénicos y de partículas en la atmósfera, etc.), usando ecuaciones matemáticas para describir los distintos componentes del sistema y las relaciones entre ellos. El desarrollo de las computadoras, ha hecho posible resolver en forma aproximada ecuaciones complejas, manejando una gran cantidad de datos que dan como resultado aproximaciones de la realidad. Con el tiempo, este tipo de modelos ha permitido simular relativamente bien, procesos tan complicados como el funcionamiento de la atmósfera (Fig. 2), incluyendo elementos tan importantes como nubes, radiación y vientos.

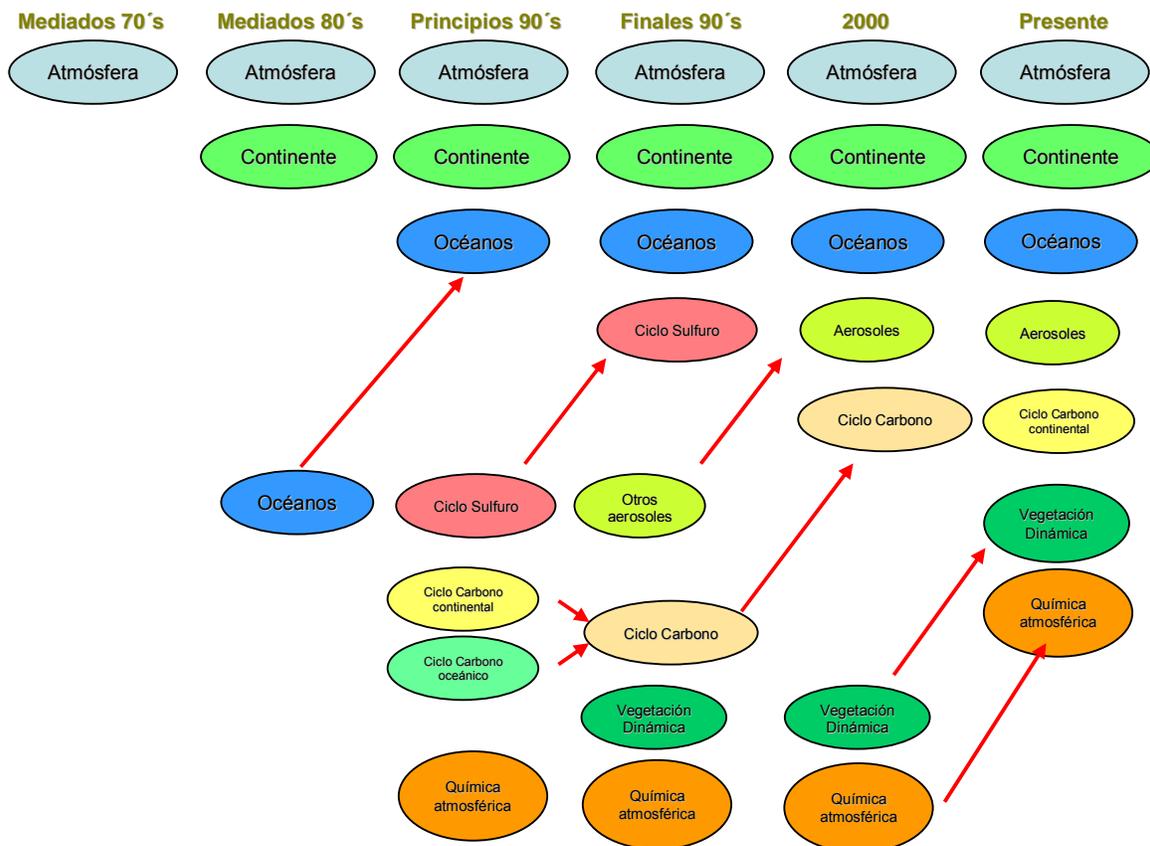


Fig. 2 Evolución de los elementos considerados en los modelos del clima

Una prueba contundente de la forma en que los modelos numéricos del clima han modificado la conducta de la sociedad, es el estudio del cambio climático. Gracias a los modelos, se ha encontrado que el calentamiento de la atmósfera por las actividades humanas es real. La utilidad de los modelos numéricos del clima no se limita al estudio del cambio climático. Desde hace ya varios años, se generan predicciones estacionales del clima que apoyan la toma de decisiones y la planeación en sectores vulnerables a

condiciones extremas del clima, como en la agricultura, la protección civil, el manejo del agua o la conservación y manejo de bosques. Ya no es extraño escuchar que el manejo de la energía, el mercado de productos agrícolas o las acciones del sector salud toman en cuenta las predicciones climáticas para gestionar el riesgo. Los modelos climáticos permiten pronosticar o hacer "experimentos" que nunca serían posibles en la realidad. Por ejemplo, si se dispone de un buen modelo climático se puede estimar cómo varía la temperatura al aumentar la concentración de un gas como el bióxido de carbono (CO₂). Una adecuada interpretación de los resultados de un modelo requiere conocer los alcances y limitaciones de éste, pues un modelo simula pero no es la realidad. Por muy bueno que sea siempre estará lejos de la complejidad del proceso natural.

Los modelos numéricos dividen la atmósfera en capas, cada capa en una cuadrícula, generando así una retícula de celdas en tres dimensiones. Con datos de temperatura y presión, entre otras variables, en cada celda se estima cómo varían estos parámetros en el tiempo según las condiciones generales y los valores de las celdas vecinas, claro según principios físicos. Hoy en día, se dispone de modelos tan complejos que consideran no sólo la atmósfera, sino también la dinámica de los océanos, de la biosfera, y la criosfera (casquetes de hielo y nieve). Los modelos, son capaces de procesar cascadas de datos que proceden de una red de estaciones, satélites y estaciones de control remoto cada vez más amplia para entregar pronósticos del tiempo precisos, aunque no exactos. Los meteorólogos saben sin embargo, que pronósticos precisos más allá de tres o cuatro días son difíciles de realizar (Fig. 3) por la naturaleza caótica del sistema climático. Ante esto, se podría preguntar, “¿por qué intentamos pronosticar el clima si no podemos pronosticar con precisión el tiempo a tres o cuatro días?” Es cierto, no podemos pronosticar el tiempo a largo plazo, pero podemos decir cosas útiles sobre el clima.

Ivan 120 HR Fcst 00 Hr = 9 Sep 2004 12Z

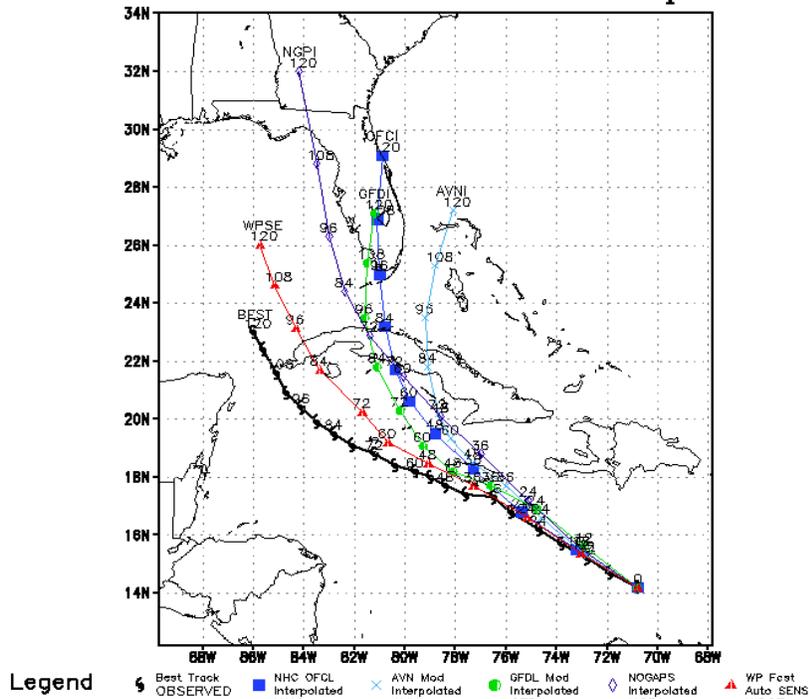


Fig. 3 Ejemplo de pronósticos a 120 horas de la trayectoria del huracán IVAN (líneas de colores) y trayectoria observada (línea negra).

La mayoría de la gente (aunque no lo admita) no sabe realmente la diferencia entre “tiempo” y “clima”. Cuando se ven forzados a diferenciar entre estos dos términos, probablemente digan que tiempo es “corto plazo” mientras que clima se refiere a una duración más larga o al promedio de muchos estados de tiempo. Una respuesta a esta pregunta la dio Edward Lorenz, quien dijo: *“tiempo es lo que usted tiene; mientras que clima es lo que usted espera”*. Implícita en esta observación de Lorenz está la aseveración de que mientras el tiempo es determinista, el clima es probabilista. Para explicar lo anterior se puede discernir entre predecibilidad del tiempo contra predecibilidad del clima, tal y como lo hace el Dr. Jagadish Shukla de la Universidad de Maryland. Considérese una ecuación para la predicción del tiempo en donde se representen los cambios de una variable en el espacio y en el tiempo. Los cambios a lo largo del eje tiempo se pueden dividir con una componente (más estable) previsible y una componente (inestable) no fácilmente explicable. La dinámica del componente inestable domina en la ecuación y hace que el error crezca tan rápido (en el plazo de 3 a 7 días) que no es posible pronosticar el tiempo más allá de ese rango. Debido a este límite, cualquier esperanza de hacer una predicción del tiempo a largo plazo (más de dos semanas) será siempre un sueño. Sin embargo, la ecuación de pronóstico también contiene una componente estable (Landa, et. al., 2008). Esta componente corresponde al clima; y con ella se puede hacer un mejor trabajo de predicción. Después de todo, se conocen suficientemente bien los factores que establecen el estado base del clima: la energía del sol, la velocidad de rotación y la masa del planeta, la composición química de la atmósfera y la distribución del océano y los continentes. Por ello, ¡la predicción del clima, es factible y, dada la mejora significativa en la calidad de los modelos del clima durante la década pasada, es incluso un asunto muy importante!. Seguirá siendo muy difícil asegurar si lloverá al medio día del día siguiente, pero será posible hacer afirmaciones sobre el estado medio de la atmósfera esperado para los próximos meses, e incluso años.

Son varios los elementos que se deben tomar en cuenta para pronosticar el clima en escalas estacionales o anuales, o para generar escenarios de cambio climático. Uno de los de mayor importancia en materia de modelación numérica del clima, ha sido el reconocer que las predicciones o proyecciones del clima sólo pueden darse en un sentido probabilístico que refleje la naturaleza caótica del sistema climático. Por ello, un pronóstico del clima se debe construir con varios experimentos numéricos que parten de condiciones iniciales ligeramente diferentes. El conjunto de todos los experimentos constituye un ensamble, que permite estimar a la condición más probable (Fig. 4). La dispersión entre esos experimentos nos habla de la confianza o incertidumbre del pronóstico y se puede expresar como una Función de Densidad de Probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés). Así, la información de pronóstico incluye no sólo el valor medio, sino también una medida de la dispersión entre los experimentos numéricos o realizaciones que forman el ensamble. Si la dispersión es baja, se tiene mayor confianza de que se llegará a una condición climática dada. Si la dispersión es alta, existe mayor incertidumbre en cuál será el estado más probable y por tanto se habla de que el clima para ese periodo o región es poco predecible. La medida de cuán predecible es el clima se puede obtener a través de experimentos con modelos GCM numéricos y determinando la dispersión entre los experimentos de los ensambles. Si recurrentemente se tiene alta dispersión entre miembros del ensamble se habla de que el clima tiene baja predecibilidad en esa región. Por el contrario, baja dispersión corresponde a una alta predecibilidad.

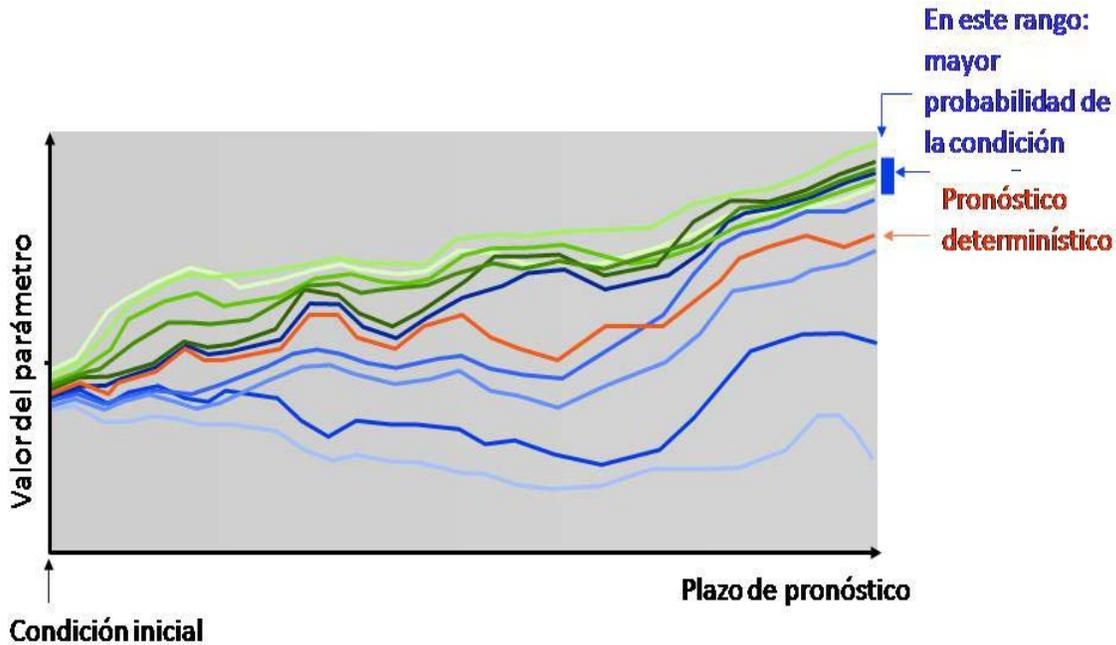


Fig. 4 Esquema representando proyecciones de un parámetro climático a partir de condiciones iniciales ligeramente diferentes y la distribución de soluciones en un plazo de pronóstico.

¿Cómo se hacen entonces los pronósticos numéricos del clima? Una posibilidad es correr un modelo para la atmósfera y el océano, quizá unas mil veces. Los resultados de los experimentos servirían para calcular las estadísticas de la condición climática más probable. Sin embargo, uno puede hacerlo de manera más inteligente y no sólo con la fuerza de la computadora. Por ejemplo, es bien sabido que la atmósfera tropical es fuertemente influenciada por las características de los océanos. Por ello, ayuda el agregar información sobre la dinámica de éstos a las predicciones del clima para que el sistema atmosférico tienda al estado que “mejor se ajuste” a las condiciones temperatura del mar (recuérdese el caso El Niño (Magaña 1999)). Bajo esta perspectiva de forzante del clima, como lo es una anomalía en la temperatura de superficie del mar, se pueden incluso hacer predicciones. El forzante varía lentamente con respecto a las variaciones del tiempo meteorológico y es el elemento clave para pronosticar el clima. Ejemplos de forzantes son la temperatura de superficie del mar, las anomalías en la humedad del suelo, los cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero o las condiciones de uso de suelo.

Dentro de los grandes foros de análisis del clima como el IPCC, se discute que aún y cuando se determine la predecibilidad de las variaciones interanuales del clima, ésta no necesariamente determinará la confianza que se tenga en las proyecciones del cambio climático. La razón principal está en que el forzante que determina unas y otras es diferente. Mientras que la temperatura de superficie del mar o la humedad del suelo son los principales forzantes de la variabilidad interanual del clima, el cambio climático responde fundamentalmente al forzante dado por cambios en la emisividad (concentración de gases de efecto invernadero) y en cierta medida a cambios en el albedo (cambios en el uso de suelo). Es por ello, que las proyecciones de cambio climático global y regional consideran a la incertidumbre en el forzante radiativo futuro como determinante para proyectar el clima. El forzante radiativo (dado por la concentración de GEI) depende de factores de orden socioeconómico, que no siguen

reglas físicas sino decisiones humanas, y por ello se habla de escenarios o proyecciones y no de pronósticos ante cambio climático.

Para estimar los potenciales impactos del cambio climático y definir acciones de prevención es necesario conocer la magnitud, ubicación y plazo al cual se puede presentar una condición anómala del clima. La única herramienta con la que se cuenta para proyectar el clima a futuro son los modelos del clima, conocidos como Modelos de Circulación General de la Atmósfera (GCMs, por sus siglas en inglés). Los GCMs permiten crear escenarios de la condición climática más probable. En general, la calidad de un modelo se determina a través de su habilidad para simular climas pasados o para pronosticar estacionalmente. Comparar climas pasados con las simulaciones del modelo requiere de datos de buena calidad (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>, enero 2010). En el caso de cambio climático, la evaluación de las proyecciones es muy difícil pues habría que esperar muchos años para analizar en qué medida se cumplen. Sin embargo, es necesario definir alguna estrategia que lleve a estimar en qué medida el cambio climático puede afectar a una región, sector económico o grupo social y la confianza que se puede tener en los escenarios del clima futuro.

Son varios los elementos que se deben tomar en cuenta para generar escenarios de cambio climático. Uno de mayor importancia es trabajar con diversos GCMs varios experimentos numéricos (realizaciones) que partan de condiciones iniciales ligeramente diferentes, para llegar a lo que se conoce como un ensamble multimodelo que permita conocer el rango más probable de condiciones futuras del clima a partir del análisis de dónde se encuentre la mayor parte de las soluciones. El objetivo de proyectar el clima por ensamble es proporcionar un cuadro más detallado de la gama de estados futuros posibles del clima que sea consistente con nuestro conocimiento del sistema, permitiendo estimar en combinación con proyecciones de la vulnerabilidad, qué puede suceder y cuáles son las varias alternativas que el usuario tiene para la gestión del riesgo. La dispersión entre experimentos o realizaciones nos habla de la confianza o incertidumbre en la proyección y se puede expresar como una PDF. Con una alta dispersión se tiene menos confianza en la proyección que con una baja dispersión. Por ello, la información del clima futuro incluye no sólo el valor medio, sino también una medida de la dispersión entre las realizaciones que forman el ensamble. Una forma de visualizar el significado de la PDF en la descripción del clima es considerando la historia reciente de algún parámetro meteorológico como puede ser la temperatura, sean valores diarios, mensuales o anuales. Imaginemos, por ejemplo, que se trabaja con valores diarios y que hay días fríos y días calurosos. Si graficamos la frecuencia de ocurrencia de los valores de temperatura en forma suavizada se puede tener una representación como PDF de una distribución gaussiana (Fig. 5).

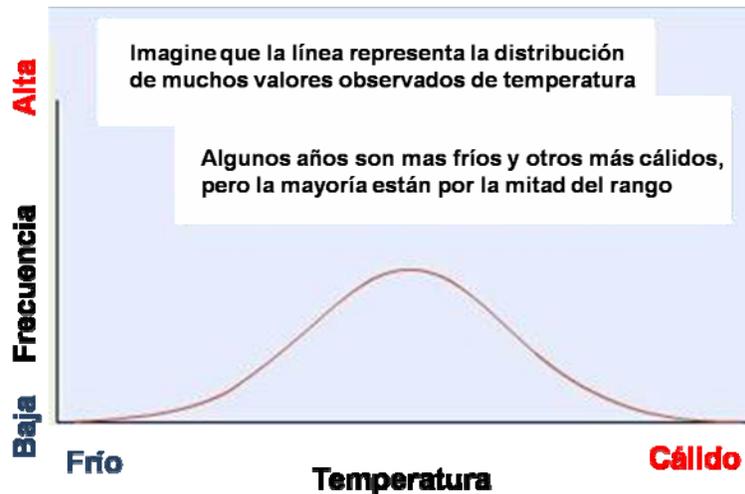


Fig. 5 Diagrama esquemático del significado de una Función de Densidad de Probabilidad para una variable climática

En ocasiones se tendrán condiciones muy frías o muy calurosas, pero serán las menos frecuentes o probables. La mayor parte del tiempo se tendrá temperaturas alrededor de la media de la temperatura, en un rango de valores que por ejemplo, abarque el 30% del área (Fig. 6). También podemos afirmar que de acuerdo a esas observaciones es muy difícil tener temperaturas más allá de las barras naranjas bajo el clima actual.

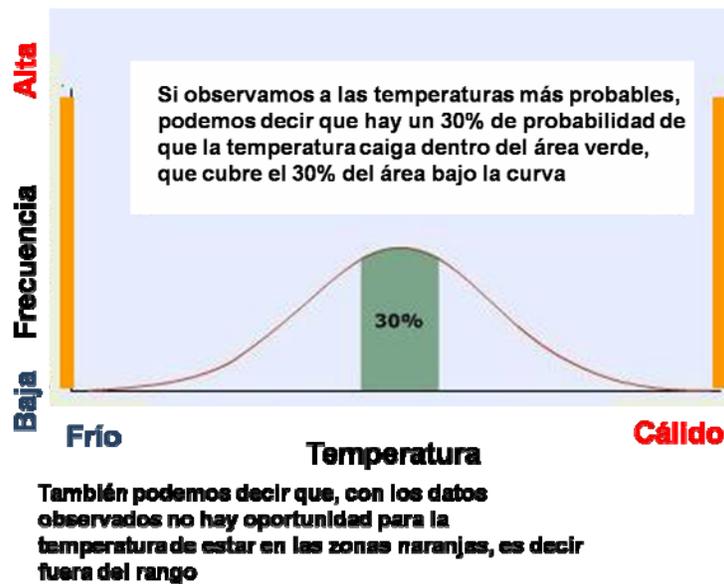


Fig. 6 Como en la Fig. 5 pero considerando un rango con probabilidad de 30%.

Una proyección de cambio climático para ese punto, debe mostrar la nueva PDF para poder obtener conclusiones sobre los rangos de la temperatura a futuro (Fig. 7). Generalmente se encuentra que la media y la varianza aumentan, y por ello, los valores extremos se mueven a temperaturas mucho más elevadas, con aumentos aun mayores que los experimentados por la media. Es por ello, que a veces resulta más importante saber cómo cambiarán los extremos que los valores medios. La nueva PDF, permitirá estimar probabilidades de que se presenten valores por encima o por debajo de un cierto valor de temperatura. Por ejemplo, en algunos casos es necesario conocer cómo

aumentará la probabilidad de eventos de temperatura mayor a 35°C, pues temperaturas superiores a este valor pondrían en riesgo a ciertos sectores de la población. El escenario de eventos extremos permite estimar si el aumento de probabilidades de ocurrencia de ese tipo de ondas de calor es significativo.

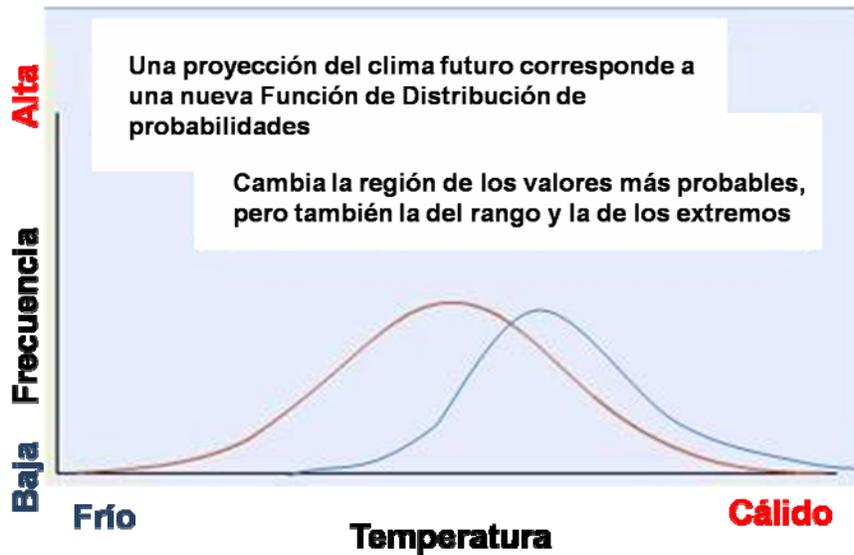


Fig. 7 Como en la Fig. 5 pero incluyendo la comparación de la condición actual (línea roja) y una proyección de cambio climático (línea azul).

3. El concepto de incertidumbre en la proyección del clima

El uso de un ensamble de modelos es particularmente importante en escalas de tiempo largas, donde los efectos del error de un modelo particular son significativos. Para escalas estacionales y más largas, los ensambles multimodelo pueden traer ventajas substanciales. Un ensamble hecho de la combinación de varias proyecciones con diversos experimentos, usando diversos modelos y errores sistemáticos, que con frecuencia son flujo-dependientes, debe dar una representación mucho mejor del espectro completo de estados futuros del clima, que si se usa solo uno o dos experimentos. El IPCC ha presentado en su Cuarto Reporte de Evaluación (IPCC-AR4, 2007) una gamma de modelos y escenarios sobre los cambios que el clima puede experimentar si se continúa incrementando la concentración de GEI por actividades humanas (Tabla 1). Es claro que las proyecciones y sus rangos son positivos por lo que no hay duda de que el planeta se calentará de seguir aumentando las emisiones de GEI. En otras palabras, tenemos gran confianza (> 90%) en que el planeta se calentará.

Tabla 1. Estimaciones de aumento en temperatura para finales del s. XXI (°C).

Escenario	Mejor estimación de aumento	Mínimo aumento probable	Máximo aumento probable
B1	1.8	1.1	2.9
A1T	2.4	1.4	3.8
B2	2.4	1.4	3.8
A1B	2.8	1.7	4.4
A2	3.4	2.0	5.4
A1FI	4.0	2.4	6.4

Una representación gráfica de los escenarios (Fig. 8) muestra cambios de temperatura global con respecto al promedio 1980-1999 (que se utiliza como la línea base), para tres escenarios (A2, A1B, y B1). Las líneas coloreadas sólidas representan las tendencias “más factibles”; las regiones sombreadas detrás de estas líneas representan los “rangos” probables que surgen de usar un ensamble multimodelo. Las barras grises a la derecha representan las temperaturas para el año 2100 para los seis escenarios en donde la raya de color representa “la mejor estimación”, mientras que la región gris sombreada representa el “rango total” de todos los experimentos.. En los escenarios del IPCC-AR4 los modelos proyectan cambios de temperatura entre uno y un poco más de seis grados de centígrados.

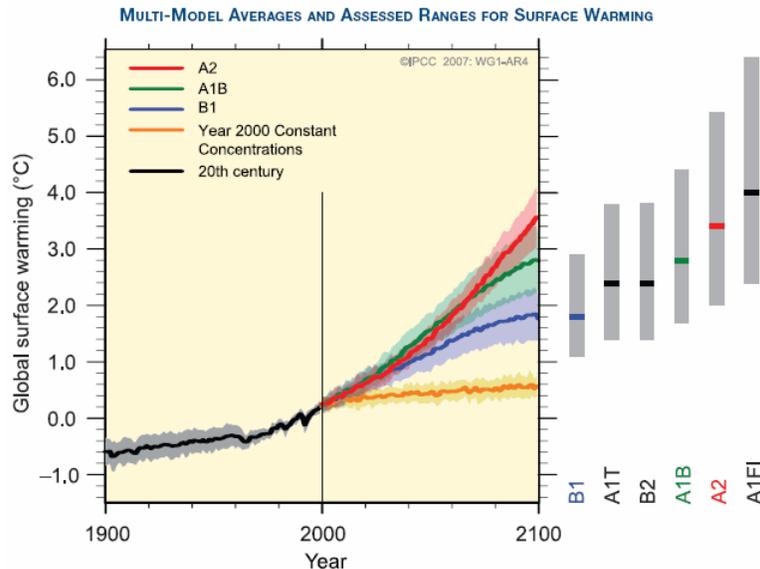


Fig. 8 Proyecciones de cambios en la temperatura de superficie del planeta bajo diversos escenarios de emisiones presentado en el IPCC-AR4 (2007) (ver texto).

La dispersión total en los escenarios surge de considerar diversos experimentos o realizaciones y el que cada uno de ellos sea ejecutado con más de una condición inicial. El no saber con precisión qué camino de emisiones seguirá la población del planeta en los próximos cien años es fuente de incertidumbre y ha quedado representada con base en la estimación de expertos (SRES, 2000). Por otro lado, las diferencias entre proyecciones para un mismo escenario de emisiones representan el carácter caótico del clima y el nivel de conocimiento que se tiene en la representación de algunos procesos físicos. Así, la incertidumbre en las proyecciones queda asociada a un rango de valores probables

futuros, o dicho de otra manera, a probabilidades de ocurrencia en un rango de condiciones futuras.

Bajo el marco de referencia anterior, estimar cómo será el clima futuro resulta en gran medida un problema relacionado con establecer las características del forzante que lo lleve a una condición o atractor determinado. Dado que el futuro del clima dependerá de cómo sean las emisiones de gases de efecto invernadero globales y en consecuencia de la magnitud del forzante radiativo. Se tiene que pensar en que más que pronósticos del clima futuro, se harán proyecciones o escenarios de cambio climático. Un escenario es: “una descripción de un estado futuro del mundo, coherente, internamente consistente y plausible” (Parry y Carter, 1998). No es un pronóstico o una predicción. Es como una serie de imágenes de cómo se podría ver el mundo en el futuro.

Hay dos fuentes fundamentales de incertidumbre en los escenarios de cambio climático que deben ser consideradas:

- 1) Las incertidumbres en las emisiones futuras, que afectan el forzamiento radiativo del sistema climático. El IPCC ha generado escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero globales, a partir de consideraciones socioeconómicas, los cuales aparecen en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés, 2000) que proveen una estimación de la incertidumbre en éstas. Este elemento cobra importancia pues los cambios en temperatura y precipitación, incluso a escala regional, pueden variar de acuerdo a las concentraciones globales proyectadas.
- 2) Incertidumbre en la sensibilidad global del clima y los cambios de patrones de circulación a escala regional que simulan los modelos del clima. Las diferencias en la formulación de los GCMs, llevan a que se generen diferencias entre escenarios aun para un mismo forzante. Así, mientras un modelo proyecta un cambio de 1°C, otro puede indicar un cambio de 2° C, debido principalmente a la formulación física de procesos de escala menor a la resolución espacial del modelo, en lo que se conoce como parametrizaciones. Similarmente, algunos modelos predicen incrementos en la precipitación, mientras que otros sugieren una disminución. Tales diferencias entre modelos son fuente de incertidumbre.

Una fuente adicional de incertidumbre, se encuentra en la variabilidad natural del sistema climático, que en gran medida es el resultado de inestabilidades internas, o forzamientos externos, como los que resultan de la actividad volcánica o la actividad solar. El verdadero propósito de los escenarios es darnos una idea de la incertidumbre, ya que ayudan a determinar las posibles ramificaciones de un hecho (en este caso, cambio climático) a lo largo de uno o más caminos, plausibles pero indeterminados.

La incertidumbre se propaga de una estimación a otra, es decir, la incertidumbre de los escenarios de emisiones produce incertidumbre en el ciclo del carbono para los modelos, y ésta se propaga en las proyecciones del clima global y regional proyectados en los modelos, que a su vez genera incertidumbre cuando se estiman los impactos en una región o localidad (Fig. 9). No se piense sin embargo que el incremento de incertidumbre nos lleva a un desconocimiento de lo que pasará. Es necesario, tener una idea de la magnitud de la señal y de la incertidumbre para darle valor a las proyecciones climáticas. Por ello, escenarios de cambio climático de 1 km X 1 km de resolución tienen tal incertidumbre que los hacen irrelevantes, pues desconocemos con ese detalle el funcionamiento del clima actual.

El Tercer Informe de Evaluación sobre Cambio Climático (TAR, por sus siglas en inglés) del IPCC fue severamente criticado por fallar en presentar sus proyecciones en términos probabilísticos cuantitativos (Allen, *et al.*, 2004). Solo se acotaron los rangos de incertidumbre sin indicación de la probabilidad y no se hizo ninguna distinción entre las declaraciones: *confianza*, reflejando un bajo grado de consenso entre expertos o grupos de modeladores, y *probable* reflejando la valoración probabilística de un evento en particular. Este tratamiento de la incertidumbre, fue corregido en el Cuarto Informe de Evaluación sobre Cambio Climático, donde los escenarios y la incertidumbre asociada yace sobre las probabilidades derivadas de múltiples experimentos más que del grado de consenso entre los grupos de modeladores o expertos.

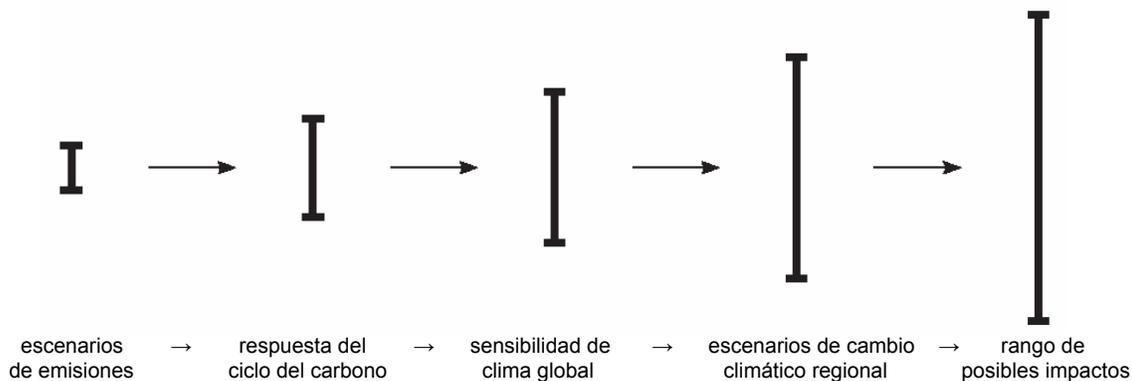


Figura 9. Cascada de incertidumbre en la secuencia entre emisiones de GEI e impactos.

Para tratar la primera fuente de incertidumbre es decir, la incertidumbre en las emisiones futuras, el IPCC generó una colección de escenarios de emisiones presentados en el SRES. Los escenarios de emisiones parten de cuatro diferentes historias de desarrollo socioeconómico global, denominadas A1, A2, B1 y B2, que describen consistentemente las relaciones entre las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas que determinan las emisiones futuras de los gases de efecto invernadero (Fig. 10). Todos los escenarios basados en una misma historia constituyen una “familia”.

La historia A1 y su familia de escenarios describe un mundo futuro de crecimiento económico muy rápido, una población mundial que llega a su máximo a mediados del siglo XXI y declina después, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. La familia de escenarios A1, se desarrolla en tres grupos con direcciones alternativas en cambio tecnológico y sistema de energía. Los tres grupos A1 se distinguen por énfasis tecnológico: uso intensivo de combustibles fósiles (A1FI), fuentes de energía no fósiles (A1T), o un balance entre todas las fuentes de energía (A1B).

La historia A2 y su familia de escenarios, describen un mundo muy heterogéneo. Patrones de fertilidad sobre regiones convergen muy lentamente, lo que resulta en un continuo aumento de población. El desarrollo económico está primeramente orientado en forma regional, con crecimiento económico *per capita* y cambios tecnológicos fragmentados y más lentos que en las otras historias.

La historia B1 y su familia de escenarios, describen un mundo convergente con población mundial que llega a su máximo a mediados del siglo XXI y luego decrece como en la historia A1, pero con un cambio rápido en la estructura económica hacia una de servicios

y economía de la información, con reducciones en la intensidad del material y la introducción de tecnologías limpias y uso eficiente de recursos. El énfasis es en soluciones globales a la economía, sustentabilidad ambiental y social, incluyendo equidad, pero sin iniciativas climáticas adicionales.

La historia B2 y su familia de escenarios, describen un mundo el cual tiene énfasis en soluciones económicas locales y sustentabilidad social y ambiental. Es un mundo con incrementos constantes en la población, a una razón menor al de la historia A2, niveles de desarrollo económico intermedio y menos rápido, así como más diversos cambios tecnológicos con respecto de las historias A1 y B1. Esta familia de escenarios está orientada hacia la protección ambiental y equidad social, enfocándose en niveles locales y regionales.

Un escenario adicional que cabe mencionar es el COMMIT y que corresponde al escenario idealizado si todos los países cumplieran las cuotas de emisiones de GEI bajo el protocolo de Kioto. El escenario COMMIT es el escenario que supone menor concentración futura de GEI y es una idealización de lo que sucedería si todas las naciones se comprometieran con el medio ambiente.

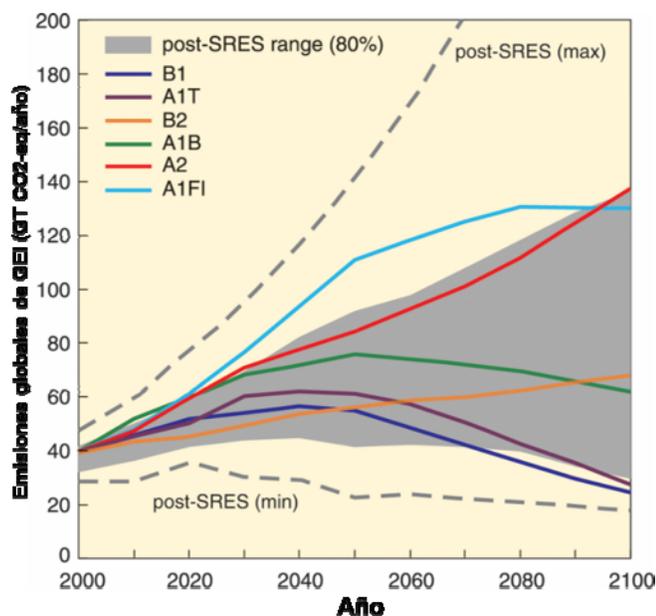


Figura 10. Escenarios de emisiones globales de GEI (CO2 equivalente) para el siglo XX1 de acuerdo a SRES. (ver texto).

La estimación del impacto del cambio de clima con base en escenarios generados por GCMs tiene por tanto incertidumbre debida al conocimiento incompleto sobre los procesos geofísicos subyacentes del cambio global (incertidumbres de GCM), la naturaleza caótica del sistema y por los escenarios futuros de emisiones de GEI (incertidumbres en la actividad humana). El desacuerdo entre diversos GCMs y los escenarios y los impactos regionales del cambio de clima, indican que el trabajar con uno o dos modelos podría llevar a las respuestas inadecuadas del planeamiento sobre adaptación, principalmente si el modelo elegido corresponde a un valor extremo de la distribución. De ahí que se haga énfasis en usar técnicas de ensamble multimodelo.

4. La generación de escenarios de cambio climático regionales

La necesidad de estimar los potenciales impactos del cambio climático requiere de conocer con mayor detalle espacial cómo cambiará el clima. Para ello, es necesario pasar de los ensambles producidos por GCMs, a ensambles de mayor resolución espacial que reflejen las características y tendencias del clima regional. Esto ha llevado a algunos a suponer que es conveniente utilizar aquel modelo que mejor simule el clima actual en dominios de interés particular. Este no es un planteamiento adecuado, pues los experimentos de cambio climático con GCMs fueron pensados en simular la respuesta global y de gran escala ante incrementos en las concentraciones de GEI y no para simular el clima de un lugar en particular. Es por ello que la calidad de los escenarios, se evalúa considerando la capacidad del modelo de responder al forzante radiativo observado en el siglo XX y comparando con los cambios de temperatura promedio global que han venido ocurriendo desde entonces. Sin embargo, algunos estudios recientes sugieren que aun cuando el GCM responda adecuadamente al forzante radiativo relacionado con cambios en los GEI del siglo XX, no hay garantía de que se tengan escenarios adecuados (Reifen y Tuomi, 2009). No resulta fácil por tanto, establecer cuál es el mejor o peor modelo para cambio climático por lo que la estrategia a seguir, dada la naturaleza caótica del sistema climático, es trabajar por medio de ensambles multimodelo (Richardson, 2000).

En materia de cambio climático y adaptación es muy importante generar escenarios regionales para analizar con mayor detalle los impactos potenciales que éste tendrá. Pero, ¿qué sucede cuando se piensa en cambio climático a escalas que incluyen fenómenos que el modelo de gran escala no fue capaz de simular? El regionalizar las salidas de un GCM no es sólo un proceso de interpolación, sino que requiere de saber qué se gana y qué se pierde cuando se presentan versiones de alta resolución espacial de un GCM. Por ello, uno de los grandes retos en el estudio del cambio climático a través de modelos es analizar fenómenos de mesoescala que tienen un fuerte impacto en parámetros meteorológicos y en cantidades derivadas, como es la disponibilidad de agua o los rendimientos agrícolas.

El clima a escala regional está determinado en gran medida por la topografía y el uso de suelo, que son en gran medida responsables de la dinámica atmosférica de mesoescala. Cambios en el uso de suelo por ejemplo, pueden generar cambios locales del clima, al modificarse el albedo, la rugosidad y la humedad del terreno. Así, la deforestación tenderá a aumentar la cantidad de energía reflejada en la superficie afectando el balance de energía local. Al mismo tiempo, la rugosidad se verá afectada al igual que la humedad en el suelo y con ello el ciclo hidrológico. Un claro ejemplo de cómo el cambio en el uso de suelo afecta el clima local es la urbanización explosiva, la cual tiende a generar el fenómeno conocido como Isla de Calor. No se piense sin embargo que el cambio de uso de suelo lleva solo a aumentos de temperatura o disminución en las lluvias. En realidad, dichas alteraciones en el ambiente pueden tener efectos de retroalimentación positivos y negativos (Dickinson, 1995). Por ello, la presentación de escenarios regionales de menos de 10 km X 10km de resolución a partir de un clima base bajo consideraciones puramente topográficas, más un cambio de temperatura o lluvia dado por un GCM de baja resolución (Hijmans *et al.*, 2005) resulta una aproximación poco sólida al verdadero problema de proyectar el clima futuro a escala regional. Basta pensar, en cuántos procesos de pequeña escala no quedan considerados y resultan en fuentes de incertidumbre, como son las circulaciones de mesoescala del tipo brisas de valle montaña o brisas de mar. A escalas de 1 km X 1 km la incertidumbre en los escenarios de cambio climático es tan

grande que se pierde con respecto de la señal. En el caso de México la distancia media entre estaciones climáticas de alrededor de 50 km.

Una posibilidad para generar escenarios de muy alta resolución espacial, es usar un modelo dinámico de clima regional. Sin embargo, en muchos casos dicho planteamiento lleva el problema de análisis del cambio climático al terreno del cómputo, pues requiere de una gran capacidad de procesamiento. Son esencialmente los grandes centros de pronóstico los que han generado escenarios de cambio climático de muy alta resolución bajo diferentes condiciones de emisiones, por ejemplo “El Simulador de la Tierra” del Instituto de Investigación Meteorológica de Japón (Pérez *et al.*, 2007). Muchos autores sugieren que es de mayor importancia contar con más realizaciones de cambio climático con GCMs, que generar uno o dos experimentos de clima con muy alta resolución espacial. Un ejemplo de la variedad de resultados que se deben generar para un análisis de los cambios del clima para las próximas décadas, se tiene en la página del *Data Distribution Center* del IPCC (<http://www.ipcc.ch>). En cada caso, los experimentos parten de diversos escenarios de emisiones que resultan en extensas bases de datos que corresponden a variables de superficie, ya que el análisis tridimensional del problema, necesario para estudiar cambios en procesos, requiere de alta capacidad de procesamiento de datos e interpretación.

Es de especial relevancia en el análisis del cambio climático contar con una aproximación de ensamble multimodelo, pues el cálculo de la probabilidad o la confianza que se tenga en una proyección puede ser cuantificado. En este sentido, las salidas de los modelos como las del DDC del IPCC o las disponibles en la base de datos MAAGIC SCENGEN, constituyen una valiosa oportunidad para analizar las probabilidades de los cambios de temperatura o precipitación. Actualmente, existe gran confianza en que el incremento de las concentraciones atmosféricas de GEI producirá un incremento de la temperatura global. Sin embargo, la estimación de cómo las altas concentraciones de esos gases pueden afectar los climas regionales es aun un problema de frontera que está acompañado de numerosas incertidumbres. Los escenarios regionales presentados en el IPCC-AR4, se centran en proyecciones de temperatura y precipitación, pero el concepto *regional* se refiere a extensiones de nivel casi continental, como fue Norte América, Europa o África. Con tal resolución espacial, es difícil pasar a la definición de acciones de adaptación para una cuenca o ecosistema particular.

La creación de los escenarios de cambio climático, es una de las etapas más importantes dentro de los estudios de riesgo ante cambio climático, pues de ellos depende la dirección de los impactos estimada. Los escenarios regionales constituyen puentes entre los encargados de los GCMs y los responsables de construir estrategias de adaptación. Por ello, los escenarios de cambio climático deben brindar información relevante para los sectores o a la medida de las necesidades del usuario, suficientemente detallada para ser utilizada en los estudios de impacto. La información debe ser representativa del rango de cambio y de incertidumbre de las proyecciones, incorporando las características de la región y diseñada para alimentar esquemas de toma de decisiones. Esto puede hacer la diferencia entre la implementación de un nuevo modelo de desarrollo sustentable con un manejo de recursos adecuado, y continuar con las tendencias de desarrollo actuales, que han puesto en riesgo a diversas regiones y sectores ante un clima cambiante. En la práctica sin embargo, es difícil poder reunir todas esas características en un escenario, pues requiere de desarrollo de capacidades entre los encargados de generar información climática y los usuarios.

Hasta hace diez años o más, la forma más directa de obtener escenarios de cambio climático era utilizar los cambios en clima proyectados por los GCM, de baja resolución espacial, y sumarlos al clima considerado como base. Dicha aproximación fue utilizada para diagnósticos de sensibilidad, pero es muy limitada pues deja del lado muchas de las necesidades de información sobre variabilidad e incertidumbre que se requiere al gestionar el riesgo ante cambio climático. Por ello, en los países en desarrollo se planteó la posibilidad de disponer de paquetes computacionales que facilitaran la presentación de las salidas de GCMs utilizados dentro de IPCC, mediante manejadores en línea de los escenarios, como ha sido el IPCC *Data Distribution Center* (IPCC DDC), MAGICC-SCENGEN y otras fuentes de datos (NCAR y *Canadian Institute for Climate Studies*). La ventaja de dichos manejadores de datos es que de forma directa permiten una representación inmediata de los escenarios disponibles con GCMs. Sin embargo, mantenían representaciones probabilísticas pero de baja resolución espacial.

Los escenarios de cambio climático regional, se pueden obtener a través de técnicas de reducción de escala (*downscaling*) estadísticas o dinámicas. En las técnicas estadísticas de reducción de escala las variables del clima regional o local (*predictandos*) se obtienen generando un modelo estadístico que las relaciona con las variables de gran escala del modelo de circulación general (*predictores*). Esta técnica ha cobrado gran importancia por permitir utilizar las salidas de los GCMs como las del IPCC-AR4 para establecer escenarios probabilísticos. La opción dinámica para la reducción de escala son los Modelos de Clima Regional (RCM). Estos modelos son similares a los modelos de clima global pero de mayor resolución espacial y por lo tanto contienen una mejor representación de elementos como la topografía o el uso de suelo dentro del dominio de interés. Dependiendo de la resolución del modelo, se puede también resolver explícitamente algunos de los procesos que son parametrizados en los GCMs. Dicha opción requiere de capacidades científicas y técnicas para poder representar los escenarios en forma probabilística, por lo que la mayoría de los experimentos en esta línea se enfocan al análisis de procesos.

Existe así, una gran variedad de herramientas de reducción de escala de las salidas de los GCMs, tanto dinámicas como estadísticas, que en su mayoría son gratis. *MM5*, *PRECIS*, *RegCM3* y *SDSM* son algunos de los más populares. *MM5*, *PRECIS* y *RegCM3* son de tipo dinámico, *SDSM* es de tipo estadístico. Los desarrollos dinámicos existentes para escenarios regionales más actualizados son del tipo del proyecto PRUDENCE en Europa, o NARCCAP para Norte América. Este último, ha iniciado en años recientes como un esfuerzo de instituciones científicas de Estados Unidos, Canadá y México para analizar simulaciones de cambio climático alta resolución espacial, con especial énfasis en los procesos y escenarios en el sentido probabilístico. NARCAAP sin embargo, adolece de un problema cuando se trata de analizar escenarios de cambio climático para México, y es que el dominio utilizado por muchas instituciones solo llega a 20°N en su frontera sur, por lo que el país no queda representado adecuadamente. Sólo algunos modelos cubren México, Centroamérica y el Caribe en su totalidad y corresponden a las proyecciones del *Centro Hadley* con el esquema *PRECIS* (CATHALAC, 2007), o el del Instituto de Investigación Meteorológica de Japón con el Simulador de la Tierra (Pérez *et al.*, 2007).

Por el lado estadístico, el *Statistical DownScaling Method* (SDSM) (Wilby *et al.*, 2002) es una de las herramientas de escalamiento espacial más utilizadas en la proyección local, pues su esquema de reducción de escala se basa en la regresión lineal múltiple a un punto, ocupando campos precipitación, temperatura, radiación, globales del GCM y

locales observados (http://www.ccsn.ca/Downscaling_Tools/SDSM-e.html). Cuenta además con un generador estocástico de tiempo meteorológico que permite simular la PDF del clima bajo cambio climático. Existe otra herramienta de regionalización de salidas de GCMs de tipo estadística, conocida como CPT, desarrollada por el *International Institute for Climate and Society* (IRI) (<http://iri.columbia.edu>). El CPT es una herramienta de regionalización de pronósticos estacionales basada en la corrección de errores sistemáticos en las salidas de los modelos a través de identificar patrones espaciales. El CPT adolece de algunas limitaciones, como el hecho de que fue diseñado para uso en pronósticos estacionales a través de una interfase Windows, lo que limita trabajar con muchos campos de forma eficiente, además de que sólo trabaja con campos mensuales. Sin embargo, en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM se ha implementado una versión para que CPT procese gran cantidad de datos que permitan reducir de escala todos los modelos ofrecidos en el IPCC-AR4. Los datos disponibles en el IPCC DDC son de escala mensual por lo que para estimar la actividad de eventos extremos diarios, se requiere de escalamiento temporal, con esquemas del tipo de Generadores Estocásticos de Tiempo Meteorológico (GETM). Los GETM más populares en la comunidad de cambio climático han sido *LARS* y *WGEN* (Semenov *et al.*, 1998 y Wilks *et al.*, 1999).

La resolución espacial típica de los GCMs (300 km X 300 km) no permite considerar los forzantes del clima local (topografía, uso de suelo). Algunas veces, los impactos de las variaciones del clima global cobran características especiales muy particulares en regiones de topografía marcada (Fig. 11), en islas o en regiones de contrastes en el uso de suelo, factores que generan circulaciones de mesoescala. La reducción de escala espacial de salidas de GCMs debe incorporar elementos que resultan en circulaciones de mesoescala y/o clima local en las proyecciones de cambios atmosféricos, entregando así un valor agregado a las salidas directas de los GCMs. Es claro que mucho de ese valor agregado dependerá del entendimiento de los procesos que generan clima local o regional y de la disponibilidad de datos para poderlo representar.

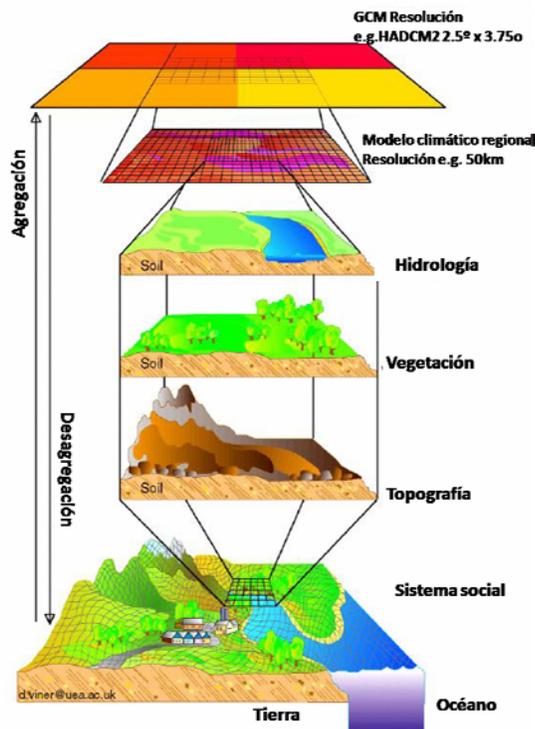


Figura 11. Esquema general del escalamiento espacial.

En los trópicos, las condiciones de mesoescala son difíciles de establecer a partir de ondas de gran escala. Tormentas convectivas o los mismo ciclones tropicales son parte esencial de los elementos que determinan el clima a escala local y sin embargo, no pueden expresarse en términos de circulaciones de gran escala de forma directa. Es por ello, que es recomendable en este caso recurrir incluso a la misma expresión de la precipitación del GCM (e.g, sus parametrizaciones) como la fuente que captura la esencia de estos procesos en estas latitudes.

En la reducción de escala, las salidas de GCMs constituyen un campo base que no necesariamente refleja los procesos de mesoescala, por lo que se deben encontrar esquemas que distingan el efecto de estos últimos en el clima local. Por ejemplo, barreras orográficas o contrastes de uso de suelo no distinguibles en el GCM pueden tener efectos sobre los patrones de temperatura o precipitación a escala local (Fig.12).



Figura 12. Esquematización de algunos factores incorporados en el escalamiento espacial (tomado de <http://iri.columbia.edu>).

La inclusión de estos factores en los escenarios finales de alta resolución espacial requiere de inducirlos a través del modelo dinámico con información sobre topografía y uso de suelo, o bien, mediante esquemas estadísticos que partan de relaciones históricas para identificar patrones en el clima de alta resolución espacial. Cada caso o región es diferente y por ello se requieren de investigaciones especiales que lleven a definir la estrategia de reducción de escala más adecuada para representar los elementos del clima regional que no aparecen en un GCM. Los resultados de la reducción de escala dependen

de la región, a través de los efectos topográficos y de uso de suelo, y en el caso de las técnicas estadísticas, de la variable a ser escalada, pues entre más discontinuidades exhiba, mayor será la dificultad para escalarla (e.g., precipitación).

La base de la reducción de escala estadística es que existen relaciones entre el clima local y el de gran escala (dinámicas o estadísticas), que permiten determinar condiciones locales a partir de información de baja resolución, y que estas relaciones permanecen válidas aun bajo condiciones climáticas futuras. Las técnicas estadísticas de reducción de escala se refieren a métodos en los que los cambios regionales o locales, correspondientes a procesos de menor tamaño que la resolución espacial del GCM, son calculados como función del clima de gran escala y pueden ser clasificados en forma general en tres categorías:

- *Funciones de transferencia*, que son relaciones estadísticas entre los valores de condición de gran escala en un punto de altura o superficie y las condiciones del clima en un sitio específico. Un ejemplo de esta aproximación es el esquema SDSM.
- *Relaciones entre patrones de circulación y clima local*, construidas a partir de clasificación de patrones de circulación y sus relaciones con condiciones particulares de tiempo en un punto o región. La identificación de patrones se realiza por Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs, por sus siglas en inglés), por ejemplo en el esquema CPT.
- *Generadores estocásticos de tiempo*, que son modelos estadísticos que pueden estar regulados por las condiciones de gran escala al momento de producir condiciones de tiempo local. Un ejemplo de esta aproximación lo constituye el esquema LARS.

Como primer paso en la reducción de escala se requiere definir relaciones estadísticas a partir de datos observados y de modelo, por lo que se necesita identificar variables climáticas de gran escala o variables independientes o predictores (Wilby *et al.*, 2000). Son buenos candidatos a predictor aquéllos que:

- Son física y conceptualmente relevantes con respecto a las variables del sitio (la variable dependiente o predictando),
- Están fuerte y consistentemente correlacionadas con el predictando, es decir el parámetro local que se trata de reproducir,
- Están disponibles en archivos de datos observados o salidas de GCM, y
- Son modelados adecuadamente por el GCM.

Existen varios métodos que pueden ser utilizados para calcular la función de transferencia (calibración del modelo) como son regresiones lineales múltiples, análisis de componentes principales, o redes neuronales artificiales. Sin embargo, cualquiera que sea el método estadístico seleccionado, la función de transferencia resultante debe explicar un alto porcentaje de la varianza del clima en el sitio de interés. El error asociado con la función de transferencia, generalmente definido como el error estándar, debe ser menor que los cambios proyectados a futuro de la variable en cuestión, si es que la función realmente determina los cambios en la región o el punto en estudio. Si este no es el caso, entonces no se puede determinar si la sensibilidad del modelo estadístico a un forzamiento climático futuro es mayor que la precisión del modelo.

Una vez que las funciones de transferencia han sido calculadas, se debe proceder a la verificación del modelo estadístico. Esto se lleva a cabo utilizando un conjunto de datos independiente de aquellos con los que se construyó el modelo. En principio, deben existir suficientes datos para que al menos con 20 años de información se genere el modelo, para que aún se disponga de 10 años de datos o más para la verificación. Aunque esto no siempre es posible, se recomienda que se guarde un subconjunto de datos observados para la verificación del modelo. Ésta consiste en comparar los valores reportados (observados) en la estación con los predichos por el modelo estadístico para el mismo periodo. Una vez que se determina la calidad del modelo, éste puede ser usado para la generación de escenarios regionales o locales de cambio climático. Determinar qué tan bien o mal lo hace el modelo es en cierta medida subjetivo y dependerá de la zona bajo estudio y de los datos disponibles. Por ejemplo, es probable que el modelo no dé todos los detalles del clima en zonas montañosas, particularmente para variables como la precipitación, sobre todo cuando se compara con regiones con topografía relativamente suave. Si el modelo y la verificación arrojan buenos resultados, entonces el modelo puede usarse con confianza para análisis de cambio climático a escala regional.

Las técnicas estadísticas, sean empíricas o dinámicas, tienen ventajas y desventajas a la hora de reducir de escala una salida de GCM:

Ventajas:

- Estas técnicas pueden dar escenarios de cambio climático más realistas en regiones o sitios particulares que los obtenidos con escenarios derivados de GCM directamente.
- Estas técnicas son computacionalmente menos demandantes que reducción de escala con modelos numéricos basados en principios físicos.
- Se pueden generar ensambles de escenarios de alta resolución espacial relativamente fácil.
- Las técnicas estadístico-dinámicas están basadas en conocimiento de procesos físicos de gran escala y el clima local.

Desventajas

- Se requieren grandes cantidades de datos para establecer las relaciones estadísticas del clima actual.
- Se requiere cierto nivel de conocimiento en el tema para aplicar la técnica.
- Las relaciones son válidas en el rango de datos usados para la calibración. Las proyecciones futuras pueden estar fuera de este rango.
- Para algunas variables locales puede resultar difícil encontrar las relaciones estadísticas.
- Una variable predictor puede no ser muy significativa para el clima actual a la hora de derivar una función de transferencia, pero puede cobrar importancia bajo condiciones de cambio climático.
- Para reducción de escala estadística-dinámica, las suposiciones fundamentales pueden no ser válidas. En ocasiones, las relaciones entre tipo de circulación y tiempo local pueden cambiar durante el periodo de calibración en algunos sitios.
- En algunos casos, el uso de una sola variable de gran escala puede no producir los cambios esperados en la variable local. Por ejemplo, derivar temperatura de superficie local de un campo de presión de gran escala, puede no funcionar bajo cambio climático, por lo que se tendría que considerar incluir campos de temperatura o humedad de gran escala.

Las fuentes de incertidumbre en la generación de información climática regional también están asociadas a las técnicas por la que fue derivada. En los métodos dinámicos existe la incertidumbre del nivel de entendimiento o representación de los procesos de nueva resolución, en las soluciones numéricas que son aproximadas y en las suposiciones o simplificaciones realizadas. En el escalamiento estadístico se requieren grandes cantidades de información del clima local, que en algunos casos está caracterizada por un grado alto de incertidumbre debido a errores en las mediciones y heterogeneidad espacial entre las estaciones, especialmente en regiones montañosas. Estas fuentes de incertidumbre adicionales a las presentadas en la generación de los escenarios climáticos pueden ser vistas como pago por información más detallada.

5. La Herramienta de Predicción del Clima (CPT) para la reducción de escala

El CPT es un esquema de escalamiento estadístico desarrollado por el IRI, con el objeto de proveer una herramienta de fácil uso en pronósticos regionales estacionales (Fig.13). El CPT, es una aplicación computacional libre para Windows (<http://iri.columbia.edu/outreach/software/>) y Linux, diseñado específicamente como corrector de errores sistemáticos a salidas de GCMs mediante la técnica conocida como *Model Output Statistics* (MOS) (Glahn, H. R., y D. A. Lowry, 1972), estableciendo relaciones entre patrones espaciales de un campo independiente y otro de respuesta.

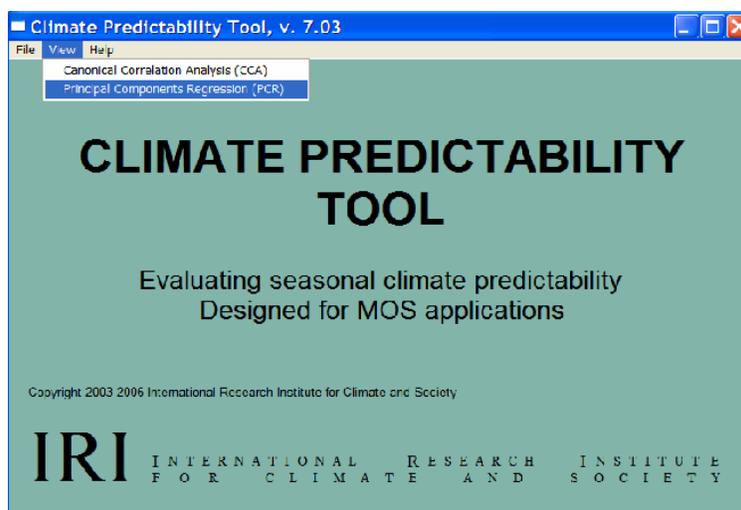


Figura 13. Pantalla de inicio de CPT en versión Windows (ver Anexo 1).

El esquema CPT permite aplicar las técnicas estadísticas de reducción de escala de regresión por componentes principales (PCR) y análisis de correlación canónica (CCA). CPT cuenta con la aplicación de diferentes técnicas estadísticas como: estandarizar los campos de los GCM, muestrear los datos, re-calibrar las ecuaciones en un segundo periodo, normalizar los campos, sustituir valores faltantes o aplicar diferentes técnicas para derivar las EOFs, todo ello con el objeto de optimizar las ecuaciones de reducción de escala (Funciones de Transferencia). CPT trabaja con campos mensuales o estacionales obtenidos de un periodo histórico de simulación del GCM (periodo de calibración), y tiene la capacidad de construir una ecuación de transferencia para cada mes.

El esquema CPT establece las funciones de transferencia del campo de alta resolución al de baja resolución para cada mes. El primer modo de variabilidad de los datos, corresponde al ciclo anual. Antes de calcular las EOFs, los datos son muestreados bajo

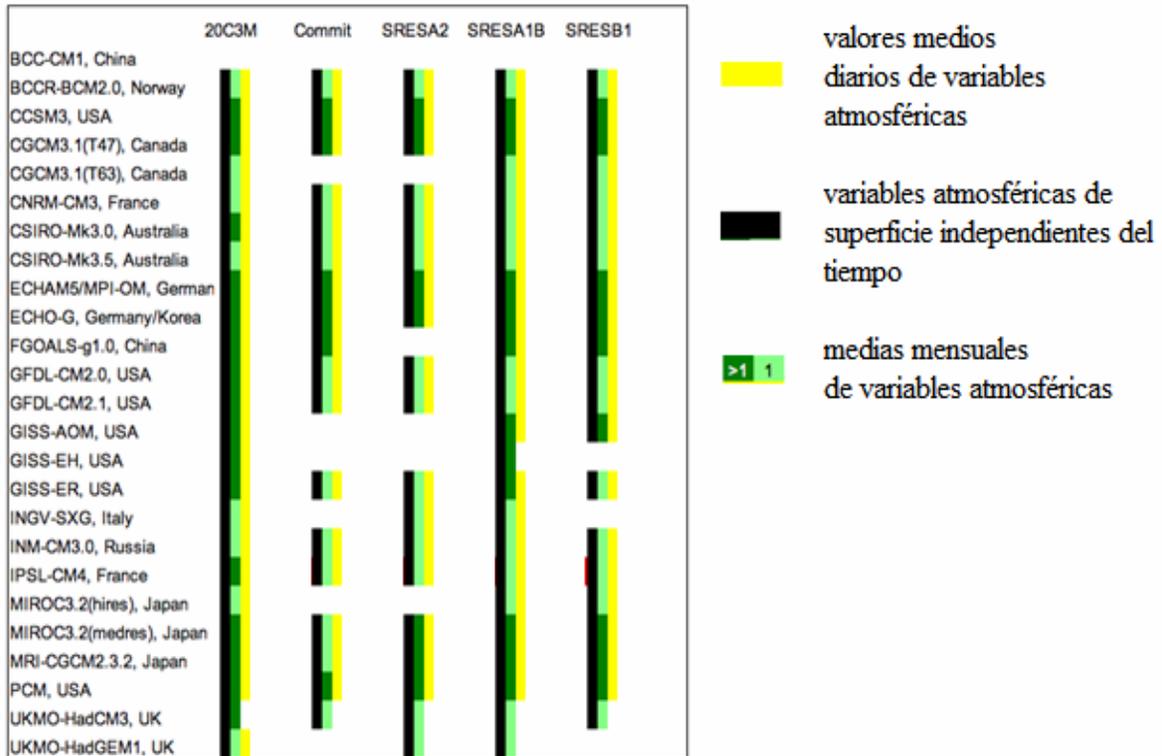
condiciones extremas, previniendo que las funciones de transferencia obtenidas sean inestables en el tiempo. Las ecuaciones de regresión se construyen con un periodo de calibración y otro de validación cruzada, que en la práctica consiste en probar la función de transferencia original en una muestra de datos independiente. Así, la base de datos del control se divide en subconjuntos. Con el primero se calibra la Función de Transferencia, mientras que con el otro subconjunto (muestra independiente) se confirma y valida el análisis original. En el caso de PCR, el esquema construye tantos modelos estadísticos como EOFs puedan ser calculados en la variable independiente (los datos del modelo). Los EOFs pueden ser calculados de diferentes maneras, ya sea utilizando la matriz de covarianza, correlación o por mínimos cuadrados. Una vez calculados, se construye un modelo de regresión optimizando el número de EOFs utilizados evaluando el desempeño que tuvo cada combinación de EOFs en explicar las características del campo observado en periodo de validación cruzada. Una de las ventajas de utilizar PCR o CCA es que están basados en los EOFs del campo del modelo, lo que permite corregir los errores sistemáticos del mismo a través de un análisis comparativo con los modos observados, ventaja sobre los métodos de simple regresión lineal. El esquema CPT provee una evaluación de significancia estadística y desempeño sobre el periodo de validación mediante índices como características de operación del receptor (ROC, por sus siglas en inglés), de utilidad en la selección del número de modos a utilizar, error cuadrático medio de las proyecciones de menor escala, correlación lineal, correlación no lineal, además de tablas de contingencia para cada punto. También reconstruye con alta resolución el periodo con el que fue calibrado, lo que provee una referencia de sus capacidades y deficiencias en la simulación. Con el modelo de regresión óptimo y el campo de pronóstico del GCM pueden calcularse los pronósticos de alta resolución. CPT también puede ser utilizado como herramienta para calcular funciones empíricas ortogonales y correlaciones canónicas a cualquier base de datos. La sección de ayuda en el sistema de esta herramienta provee una amplia descripción de todas las técnicas que hace uso.

En el proceso de regionalización estadística se necesitan dos bases de datos: 1) Salidas de GCM y 2) Datos observados puntuales o en malla regular de alta resolución. De los datos de modelo se necesitan dos conjuntos diferentes, uno que será utilizado en la construcción del modelo de regionalización en un periodo para calibración, y otro que será utilizado para las proyecciones de los escenarios regionales. Los datos de calibración deben ser simulaciones correspondientes a un periodo observado, ya que “comparando” uno y otro, se construirán los modelos de corrección para los escenarios del futuro. Para la construcción de escenarios de cambio climático se toman las salidas de los modelos utilizados para el IPCC-AR4 (IPCC DDC, <http://www.ipcc.ch>). Se dispone de escenarios de clima bajo condiciones A2, A1B, B1 y COMMIT para el periodo 2000-2099. Para la construcción y validación de la función de transferencia se usan los datos de la simulación de control del siglo XX (escenario referido como 20c3m) o sea del periodo 1900-1999. Las variables utilizadas son razón de precipitación por día en resolución mensual y temperatura media mensual. Los modelos que contribuyeron en el IPCC-AR4 son 23, con solo una o varias realizaciones para los diferentes escenarios de emisiones (ver tabla 2). El escenario A1B fue el que más participación tuvo, con 22 GCM. Una descripción completa de cada uno de los modelos, sus centros de creación, corridas, variables y consideraciones se puede encontrar en http://www.pcmdi.llnl.gov/ipcc/info_for_analysts.php#time_info.

La base de datos observados se puede tomar del Centro de Investigación Climáticas, de la Universidad de Norwich, conocido como CRU, correspondientes a precipitación

acumulada mensual y temperatura media mensual en una malla interpolada de 0.5° X 0.5°, que comprende un periodo de 102 años, 1901 a 2002.

Tabla 2. Periodos de simulaciones de los modelos participantes en el IPCC-AR4 bajo los escenarios A2, A1B, B1 y COMMIT y la simulación de control del siglo XX.



Fuente: Modificación al original presentado por Meehl et al., 2007.

5.1 El CPT como generador de escenarios de cambio climático

CPT fue diseñado para regionalizar pronósticos estacionales (unos cuantos meses de tiempo de pronóstico). Esta característica está determinada por la forma en que construye las ecuaciones de regresión, en las que CPT arregla los modos reproducidos por modelos de tal forma que expliquen la mayor varianza del campo de alta resolución. CPT fue diseñado para proyecciones estacionales y bajo este esquema elimina el primer modo de variabilidad (primer EOF), que corresponde a la climatología del campo (Fig. 14a) y en pronósticos estacionales su información es irrelevante, ya que los modos de interés son los que determinan las anomalías estacionales o sea, el segundo, tercero, cuarto modo, etc. (Fig. 14b, 14c, 14d). Sin embargo, la componente temporal del primer modo (Fig. 15) contiene el comportamiento histórico de todo el campo, y por lo tanto, la tendencia, que es la componente base de los escenarios de cambio climático. Al hacer proyecciones de periodo más largo, es necesario considerarla. Incluso, para evaluar las proyecciones de los GCMs de cambio climático es más importante capturar la componente de tendencia del primer modo, que las siguientes componentes (Fig. 15), ya que en ésta se evalúa la sensibilidad del sistema climático ante el forzante radiativo.

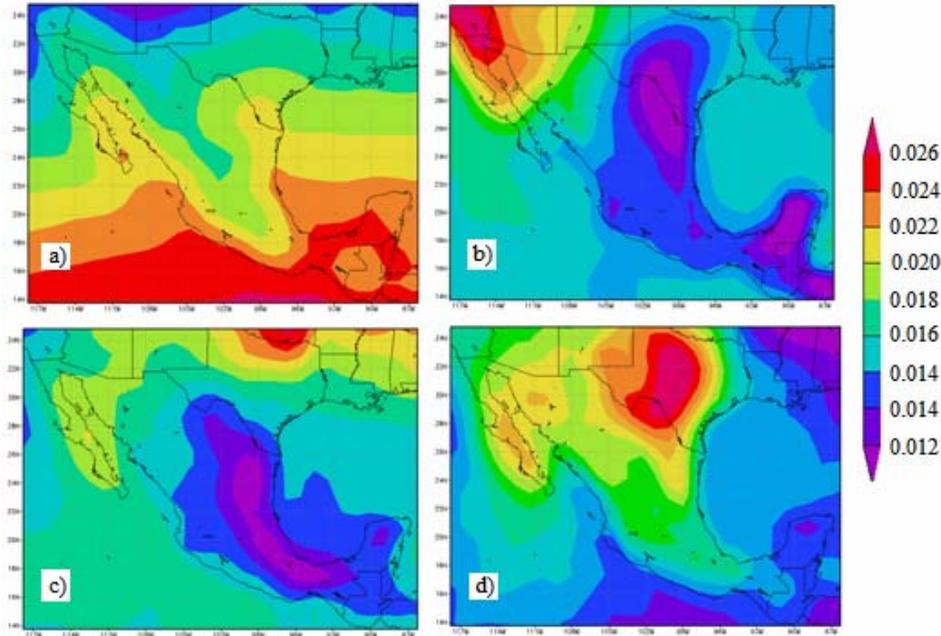


Figura 14. Modos espaciales de temperatura media del mes de junio del periodo 1901-1970, del escenario 20c3m realizado por el modelo mriroc3_2_hires. a) primer modo, b) segundo modo, c) tercer modo y d) cuarto modo.

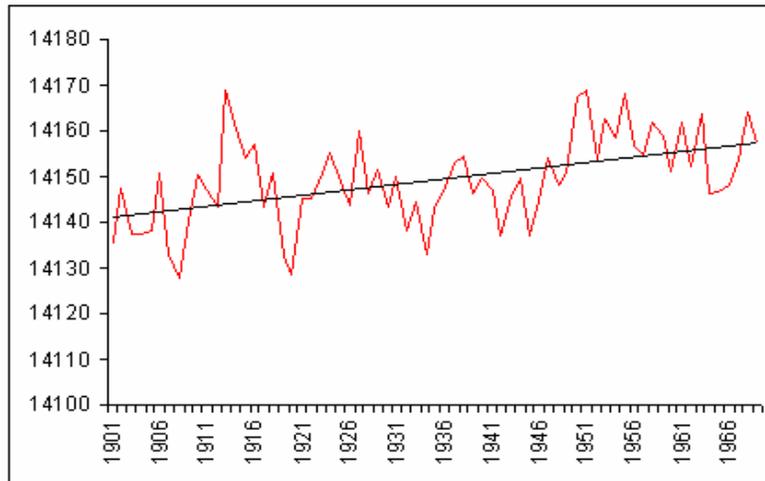


Figura 15. Coeficientes del primer modo de variabilidad temporal de temperatura media del mes de junio del periodo 1901-1970, del escenario 20c3m realizado por el modelo mriroc3_2_hires. El eje y corresponde a la magnitud del coeficiente del EOF1 que debe multiplicarse por los valores del modo 1 de la Fig. 14 y dividirse entre 10 para obtener temperatura en °C.

Para este estudio, se modificó el código fuente de la versión Linux de CPT para hacer el cálculo las ecuaciones de regresión considerando el primer modo de variabilidad y con esto, se considera al esquema capaz de hacer proyecciones climáticas en periodos largos. Vale la pena mencionar que la variabilidad del ciclo anual sigue siendo nula, ya que el esquema CPT funciona para cada mes por separado.

Como se ve en la figura 15, existe una componente lineal en el primer modo de variación correspondiente al campo climatológico (Fig. 14a), que puede ser asociada al forzante

antropogénico inducido durante toda la corrida de control del siglo XX. Los siguientes modos capturan las componentes de variabilidad del campo climatológico, que son determinantes en los pronósticos de tipo estacional, pero de segunda importancia en las proyecciones de cambio climático, ya que con los escenarios de cambio climático la meta es proyectar el valor medio para un periodo, y no tanto las variaciones individuales de cada año, que dependen de variabilidad en la temperatura de superficie del mar. Así, con la modificación realizada al esquema CPT se le da prioridad en la proyección al modo que contiene el forzante antropogénico, relegando al segundo término las variaciones particulares de cada año.

Antes de proceder a la regionalización de las salidas de GCMs se deben seleccionar los modelos que más “confianza” generen y sirvan para producir escenarios de cambio climático regional. Los GCMs deben cumplir dos condiciones para estudios de cambio climático (Wilby, 2004).

Primera, los GCMs deben ser capaces de reproducir la tendencia del clima observada en el último siglo para quedar claro que son capaces de responder al forzante radiativo.

Segunda, deben simular adecuadamente, bajo algún criterio relativamente arbitrario, características del régimen climático de las regiones de interés.

Una de las suposiciones fundamentales en el proceso de escalamiento mediante técnicas estadísticas es que la variable independiente (del GCM) sea de confianza, esto es, que la relación entre ésta y el campo observado (variable dependiente) esté basada en procesos físicos. La relación entre ambas variables en este trabajo es directa, es decir precipitación de baja resolución con precipitación de alta resolución, temperatura de baja resolución y temperatura de alta resolución, por lo que su relación es meramente de corrección de errores sistemáticos.

Para evaluar la calidad de la simulación bajo forzante radiativo del siglo pasado, se calcula la tendencia anual simulada en precipitación y temperatura de la prueba de control del siglo XX. Esta evaluación se aplica a los veintitrés modelos participantes en el IPCC-AR4 en el ensamble de la simulación del siglo XX. La tendencia fue calculada para el periodo 1901-1969 mediante una línea recta que pasa del promedio de la primera década, al promedio de la última década, tomando la pendiente de su ecuación. Los cálculos se hicieron para cada punto de malla de modelo dentro del dominio mostrado en la figura 16a. La tendencia en temperatura observada en este periodo es en promedio positiva en todo México, salvo en la región noreste; los veintitrés modelos simularon esta tendencia en forma adecuada, aunque el calentamiento más intenso en la región noroeste (Fig. 16b), sólo fue capturado por algunos modelos. Sin embargo, se consideró aceptable su simulación de la tendencia por lo que la mayoría de los modelos cumple con el primer criterio.

En algunos casos se podría exigir la misma condición de simulación de la tendencia, en la precipitación, algo que parece demasiado demandante para los GCMs. En la precipitación no hay señales tan claras de tendencia a nivel regional para el siglo pasado, pues la magnitud de la tendencia observada es pequeña y el patrón observado tiene estructuras de mesoescala, difíciles de simular por un GCM de baja resolución.

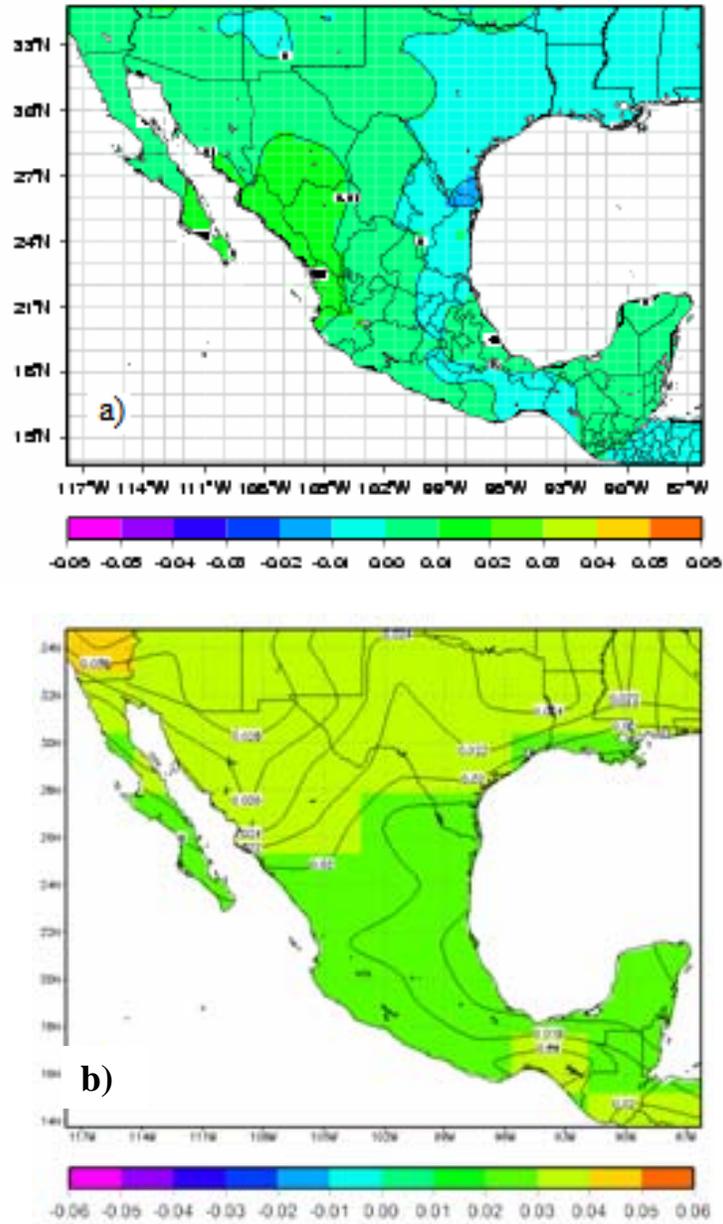


Figura 16. Tendencia lineal de temperatura media anual (°C) calculada para el 1901-1999 a partir de a) observaciones, b) el GCM GFDL.

Para evaluar la segunda condición, se pueden tomar cuatro puntos en México con ciclos climáticos anuales contrastantes. Simular el régimen climatológico, en el noroeste, sur-Golfo de México, centro, y noreste (Fig. 17). Se promedian los valores mensuales de cada variable (precipitación y temperatura) en las diez décadas del siglo XX de la simulación de control para cada uno de los veintitrés modelos, y se comparan con el equivalente del campo observado. La comparación muestra que aunque la evolución del ciclo anual es similar, existen errores sistemáticos. Afortunadamente, una de las ventajas de trabajar con CTP es su capacidad de corregir dichos errores. Por ello, este segundo criterio no es un obstáculo mayor para considerar todos los modelos usados por el IPCC-AR4.

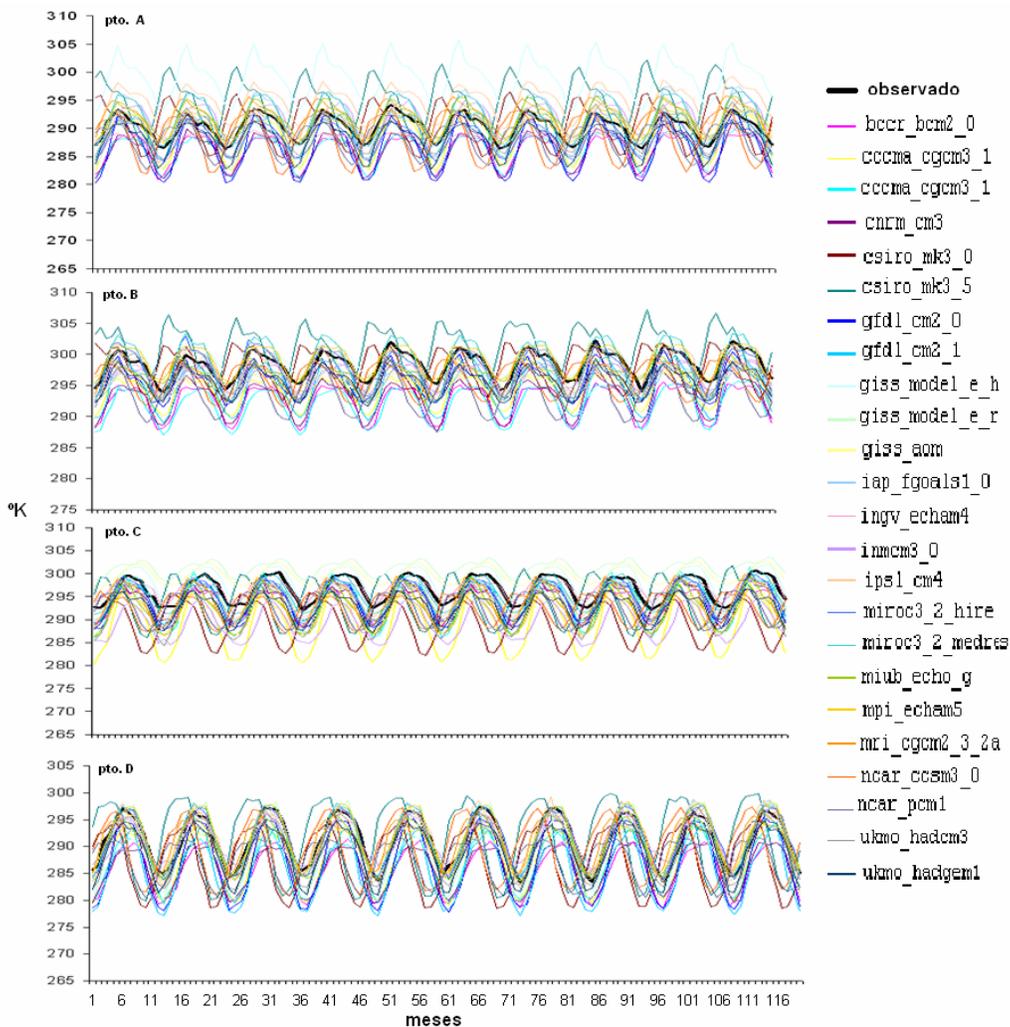


Figura 17. Promedios mensuales por década de temperatura media mensual de los modelos usados en el IPCC-AR4 (líneas delgadas) para diferentes puntos de malla sobre México y promedio mensual decadal observado (línea gruesa negra). a) noroeste, b) centro, c) Golfo de México sur y d) norte-noreste.

Cumplidos los criterios para considerar confiables las salidas de los GCMs para estudios de cambio climático en México y por tanto, su regionalización, se puede aplicar el esquema CPT modificado. La regionalización se hace para cada variable de manera independiente mes a mes. Se construyen los modelos de regresión (funciones de transferencia) entre la simulación del GCM y el campo observado (de alta resolución espacial) en el periodo conocido como de calibración (1901-1969). Los 30 años restantes (1970-1999) se conservan para validación, es decir como muestra independiente.

Cuando se considera el ensamble de la anomalía de temperatura media anual simulada por 19 modelos en el periodo de muestra independiente para un punto en el norte de México el conjunto refleja la tendencia observada dentro del rango desplegado por el conjunto de todas las simulaciones (Fig. 18). La mejor simulación no la provee un modelo en particular, sino el promedio y la dispersión de todos. Por tanto, se mantiene el mayor número de proyecciones.

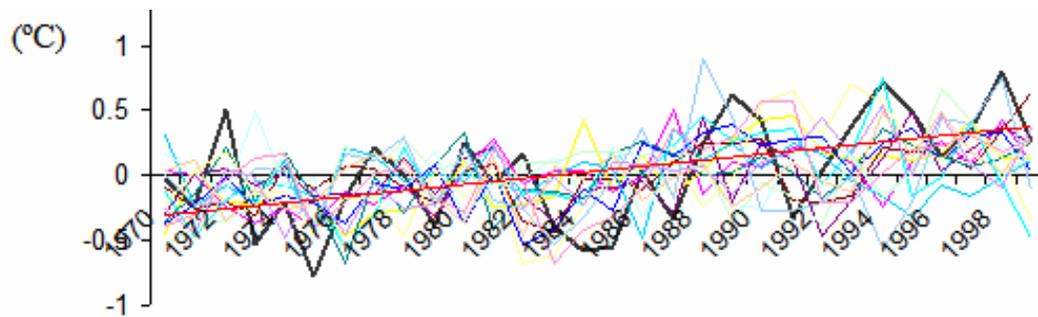


Figura 18. Anomalías de temperatura media anual observada (línea negra) y simulada por 19 modelos regionalizados en el periodo 1970-1999, para un punto en el norte de México. La línea de tendencia observada (rojo).

Una vez analizados los modelos CPT para cada GCM y mes, la regionalización se extiende a proyecciones bajo los escenarios de emisiones SRESA2, SRESA1B, SRESB2 y COMMIT. La comparación entre la resolución típica del GCM, de aproximadamente $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, y la nueva resolución de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, construida con cada GCM regionalizado con CPT muestra claramente el avance para simular los patrones regionales del clima (Fig. 19). El CPT imprime todos los modos de variabilidad de mayor resolución espacial contenidos en los datos observados para el periodo de calibración, surgiendo en forma más clara las características de mesoescala relacionadas con la orografía.

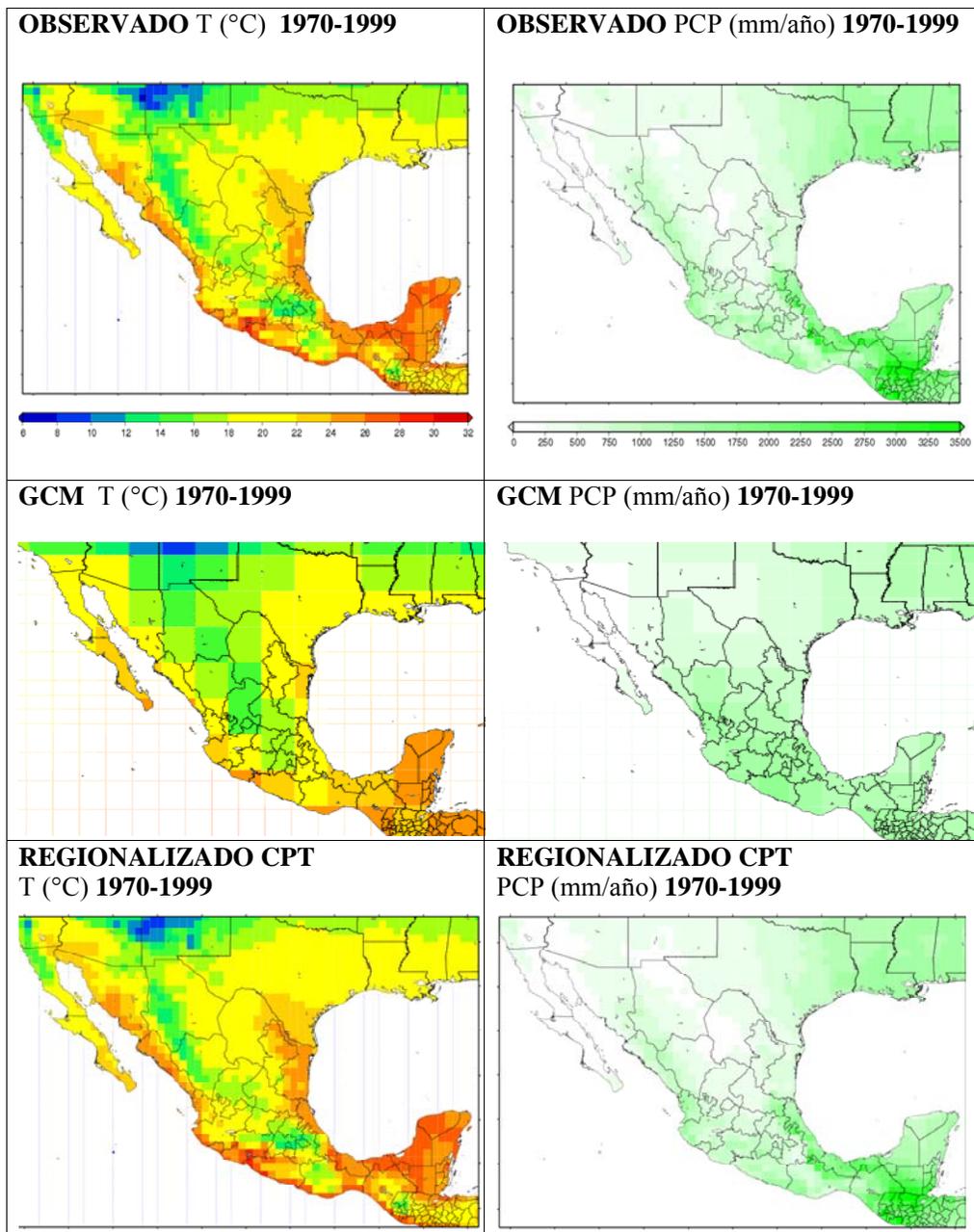


Figura 19. Escenarios de temperatura media anual y precipitación acumulada anual para el periodo 1970-1999 a) observados con resolución de 50 km X 50 km, b) simulados por el ensamble de GCMs, y b) regionalizados por medio de CPT.

Una vez establecido que la herramienta CPT permite una regionalización estadística adecuada, se puede pasar a construir los escenarios de Cambio Climático regionales, necesarios en la estimación de impactos.

5.2 Los escenarios de cambio climático regional

El Instituto Nacional de Ecología ha compilado escenarios regionalizados de cambio climático a los cuales se tiene acceso en la página:

http://www.ine.gob.mx/descargas/climatico/e2007o_escenarios.zip

Aplicando la reducción de escala a las salidas de los GCMs utilizados en IPCC-AR4 es posible definir las regiones de México donde el cambio del clima será más importante. En proyecciones con el modelo *miub_echo_g* de temperatura hacia finales del presente siglo, el máximo calentamiento se encuentra hacia el norte-noroeste de México, con una magnitud alrededor de 4.5° C para el escenario de emisiones A1B sin escalar (Fig. 20a). Después del escalamiento con CPT (Fig. 20b) la señal parece ser más importante hacia el Golfo de California. En el caso de la versión regionalizada, el máximo incremento de temperatura sobre México es del orden de 3.5°C, aunque con una ubicación más hacia la zona occidental en el caso de la proyección regionalizada. Esto se debe a que CPT ha corregido los errores sistemáticos del modelo *miub_echo_g*

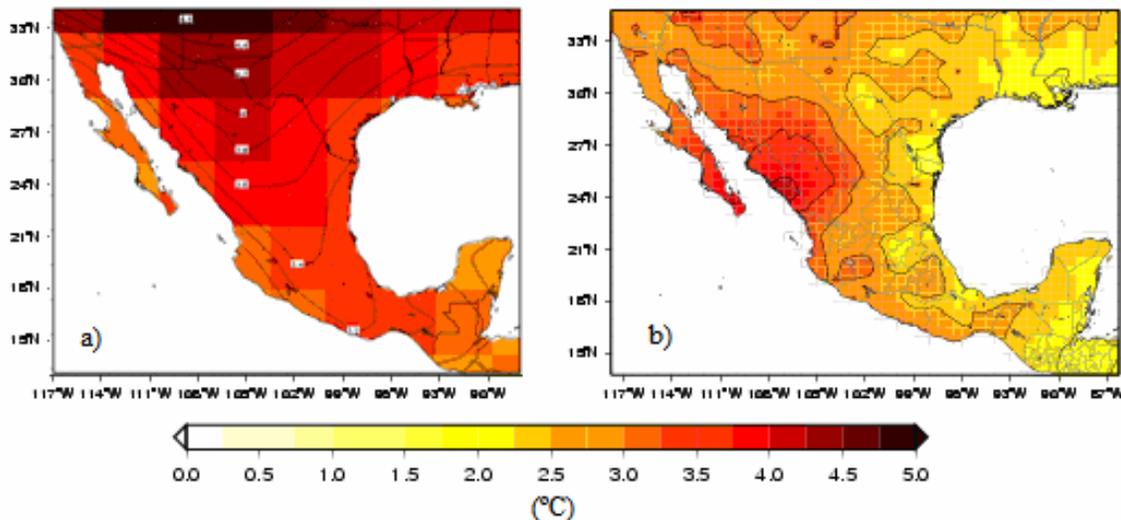


Figura 20. Escenario de cambio en temperatura 2080-2099 bajo el escenario de emisiones SRESA1B con el modelo *miub_echo_g* (a) con baja resolución espacial (en una malla de 2.5° X 2.5°) y (b) el mismo modelo pero regionalizado (en una malla de 0.5°x0.5°).

En el caso de la precipitación simulada con el mismo modelo, *miub_echo_g*, la magnitud de los cambios no es alterada significativamente (Fig. 21a), aunque el esquema CPT tiende a corregir la distribución espacial de las anomalías (Fig. 21b). Las diferencias reflejan la forma en que funciona el esquema de reducción de escala CPT, utilizando las tendencias históricas observadas para corregir los errores sistemáticos del modelo en los años calibración y propagándolos hacia el futuro, que es en general el funcionamiento de todo modelo estadístico basado en el esquema de una regresión.

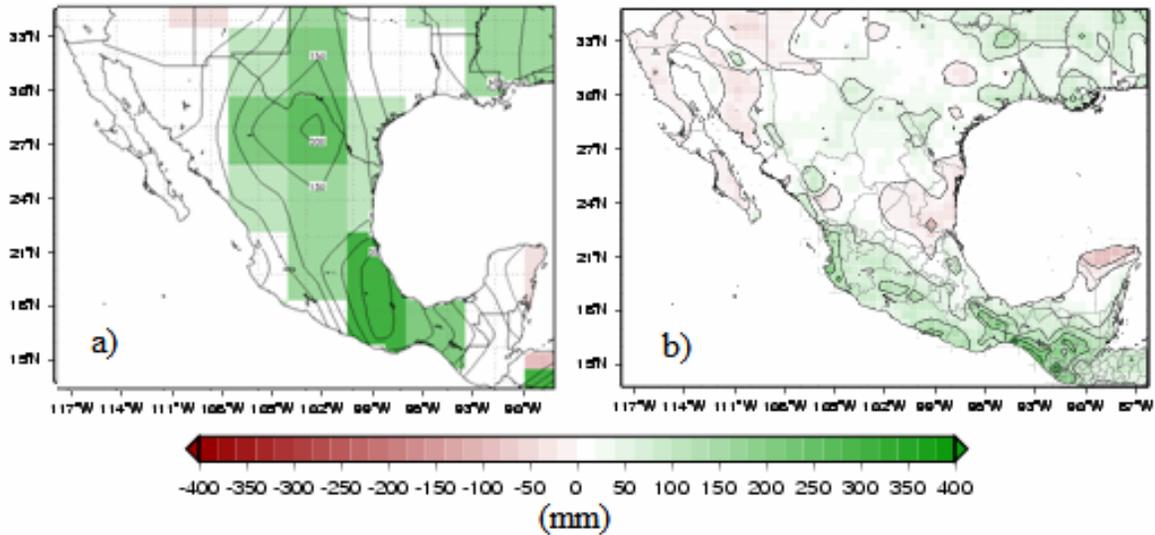


Figura 21. Escenario de cambio en precipitación regionalizado bajo el escenario de emisiones SRESA1B, en JJA 2080-2099, (a) con el modelo miub_echo_g de baja resolución espacial y (b) el mismo modelo pero regionalizado mediante CPT.

La esencia de las proyecciones del clima a futuro radica en las características del forzante. Cuando éste es intenso, la respuesta del modelo tiende a concentrar las soluciones (simulaciones) en un atractor particular, aun y cuando existan diferencias dadas por el uso de una condición inicial distinta en cada realización. Por ello, las proyecciones del clima a futuro requieren mostrar que el atractor del clima existe dando mayor confianza sobre hacia dónde va el clima. Para ello, se realizan diversos experimentos con condiciones iniciales diferentes entre sí, y se analiza la sensibilidad de las simulaciones bajo una condición de frontera (forzante) dada. La comparación entre realizaciones de un mismo modelo, en la alta y baja resolución permite distinguir la dispersión entre los estados climáticos futuros dados por condiciones iniciales ligeramente modificadas, procedimiento seguido en los pronósticos estacionales del clima. En el caso de la temperatura, el patrón de las variaciones entre cada experimento es relativamente pequeña, mostrando que el forzante radiativo lleva al clima, simulado por los GCMs a un mismo estado (Fig. 22). Tal situación es distinguible aun y cuando se trata de la versión regionalizada del modelo (Fig. 23).

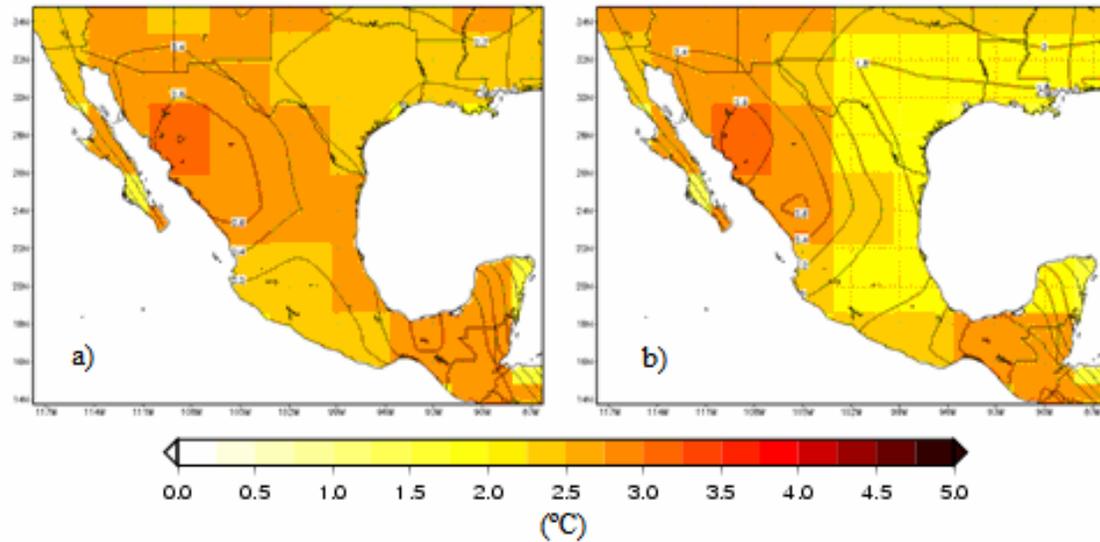


Figura 22. Realizaciones temperatura media anual por el modelo cccma_cgcm3_1 para finales del siglo XXI bajo el escenario A1B, (a) caso 1 y (b) caso 2.

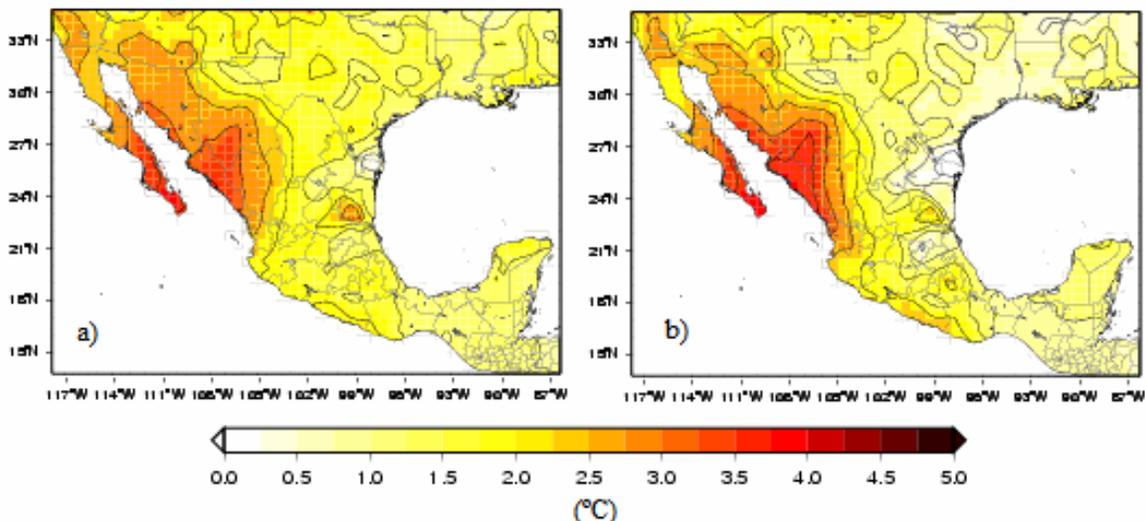


Figura 23. Como en la Fig. 22 pero para la versión CPT regionalizada del modelo cccma_cgcm3.

El escenario con el que más proyecciones regionalizadas se han construido a través de CPT es SRES A1B con 18 modelos y aproximadamente 90 realizaciones; SRESA2 tiene 14 modelos con alrededor de 70 realizaciones; SRESB2 con 15 modelos y aproximadamente 70 realizaciones, y el escenario COMMIT con 12 modelos y aproximadamente 50 realizaciones. Tener una muestra suficientemente grande es un elemento fundamental en la construcción probabilista de proyecciones del clima futuro. Para formar el ensamble se puede tomar la mediana y una medida de dispersión entre los miembros. Usando la mediana se asegura que el ensamble no tiene sesgos estadísticos y corresponde al valor más probable. En los últimos años ha sido práctica común el utilizar la dispersión entre proyecciones como una medida de la incertidumbre (Meehl *et al.*, 2007) que puede ser algún rango intercuantil o el rango donde exista el 80% de las realizaciones, dejando 20% en cada cola de la distribución como proyecciones extremas y *outliers*. Los resultados de ensamble regionalizado muestran que es en la región noroeste donde es mayor el aumento proyectado para la temperatura (Fig. 24). Nótese que la

escala de colores corresponde a la magnitud de la mediana y las isóneas a una medida de dispersión entre los miembros del ensamble.

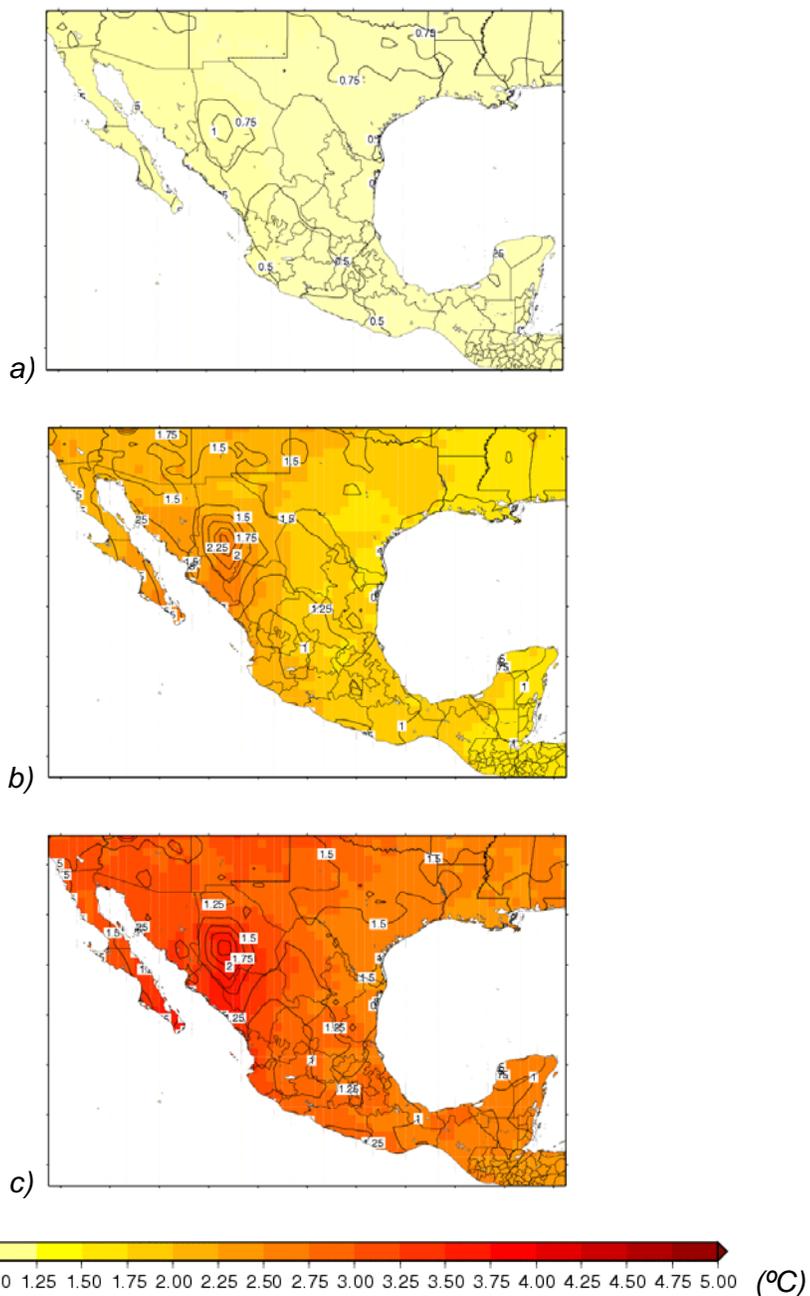


Figura 24. Anomalía de temperatura media anual (color) y dispersión (líneas y números) bajo el escenario A2 en los periodos: (a) 2010-2039, (b) 2040-2069 y (c) 2070-2099

Bajo un escenario de menores emisiones, como lo es el A1B (Fig. 25), los incrementos proyectados para la temperatura media anual en superficie son menores que para A2, aunque el patrón espacial que se obtiene es muy similar. Los mayores incrementos se esperan hacia finales del siglo XXI y pueden alcanzar los 3°C entre Sinaloa y Chihuahua.

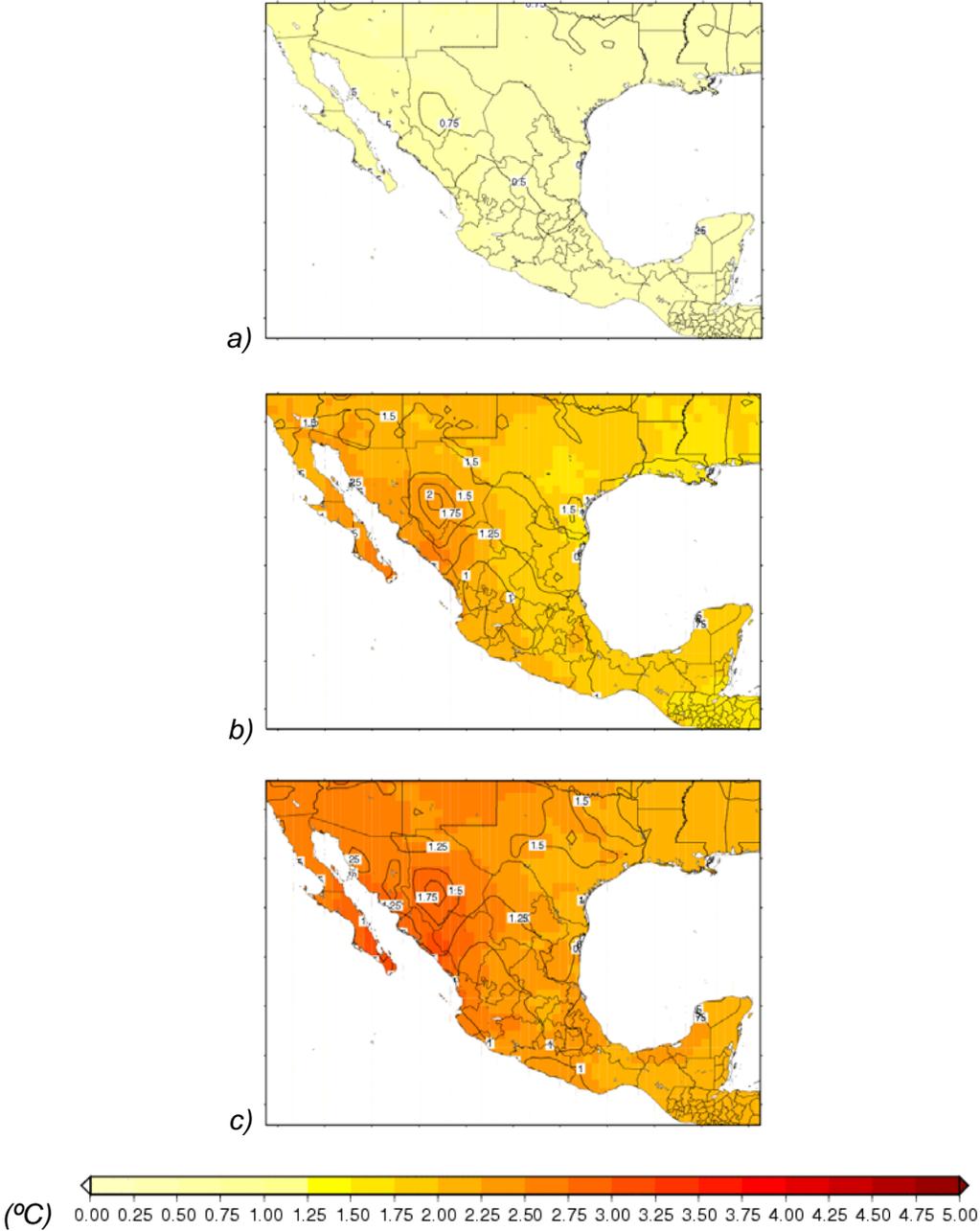


Figura 25. Como en la Fig. 24, pero para el escenario A1B

Uno de los aspectos interesantes de los resultados obtenidos, es que el patrón es similar al que se obtiene con algunos experimentos realizados con modelos dinámicos. Por ejemplo, el *North American Regional Climate Change Assessment Project* (NARCCAP) coordinado por NCAR ha comenzado a publicar algunos de los resultados obtenidos con modelos dinámicos de alta resolución espacial y la tendencia a un noroeste mexicano experimentando un mayor incremento de temperatura es similar al obtenido con CPT, principalmente en el noroeste de México (Fig. 26).

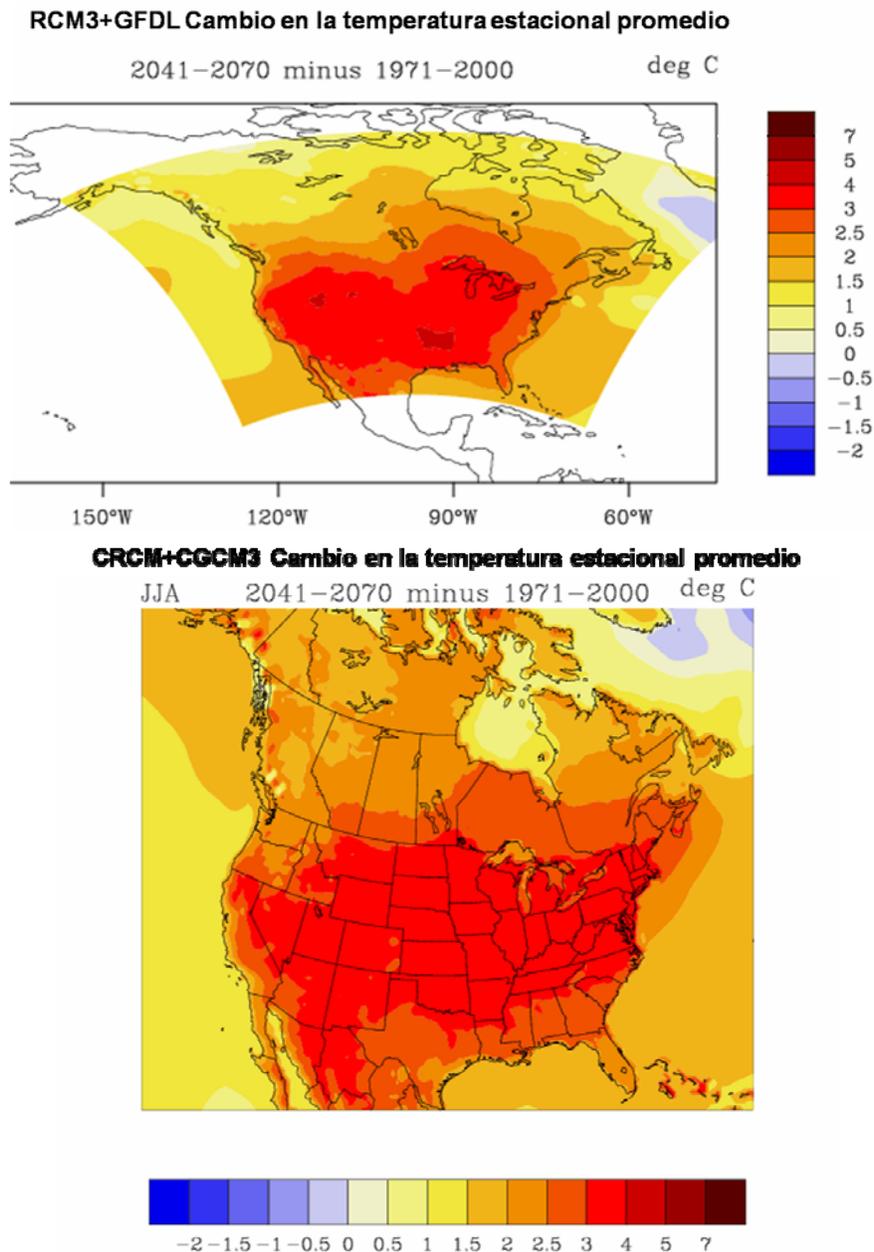


Figura 26. Dos ejemplos de escenarios de cambio en temperatura de superficie para verano utilizando modelos numéricos dinámicos (tomado de NARCCAP)

Una forma de ver los cambios con el detalle mensual y de analizar la dispersión entre proyecciones es revisando la magnitud de los cambios en el ciclo anual. Para ello es posible considerar una región y graficar el cambio de temperatura que entrega cada modelo. Se tiene que a pesar de que en promedio, los modelos dan un cambio aproximado de 3.0°C para el noroeste bajo el escenario A1B, hay diferencias de incrementos esperados mes a mes de acuerdo al GCM (Fig. 27). Algunos modelos proyectan incrementos de hasta 5°C o de tan solo 1°C para el noroeste de México, los cuales pueden ser considerados *outliers* en la distribución. Claramente se tiene una dispersión de 3 a 4°C es decir, del orden de magnitud de la señal que hace que la incertidumbre esté en cierta medida asociada al proceso de reducción de escala espacial, siendo éste el precio que pagar por disponer de escenarios más detallados.

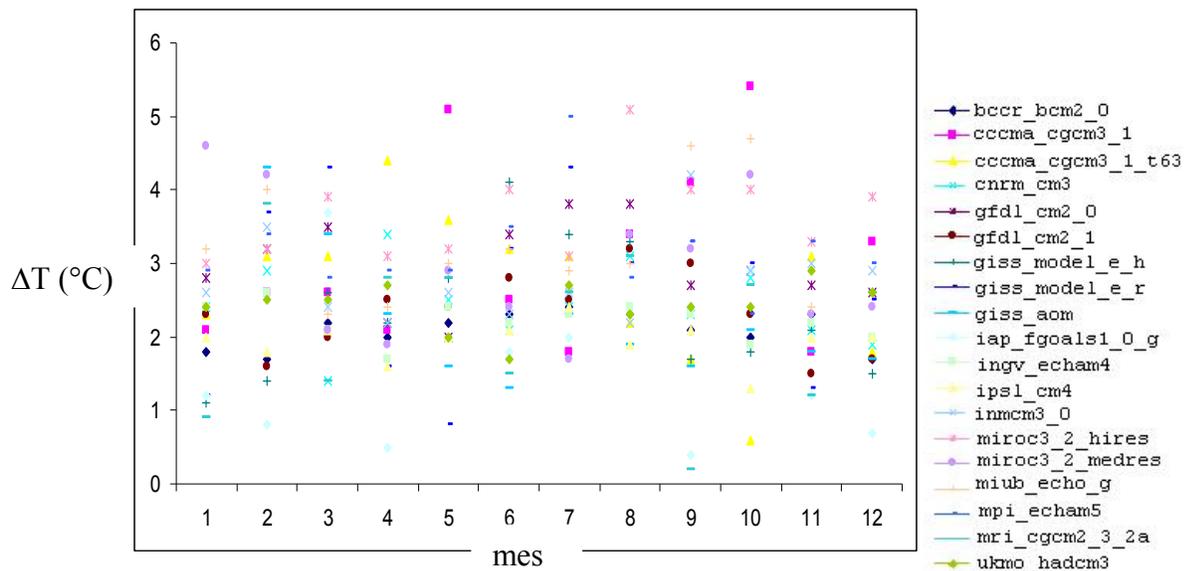


Figura 27. Anomalía mensual de temperatura media para diferentes modelos CPT regionalizados bajo el escenario A1B para el noroeste de México en el periodo 2070-2099.

En el caso de la precipitación se tiene mayor dispersión entre escenarios regionalizados (Fig. 28). La zona del norte del Golfo de California parece como una de las regiones en que el cambio porcentual de precipitación será mayor. Esto está muy relacionado con el hecho de que es una zona en donde la lluvia es escasa y por lo tanto una pequeña anomalía puede resultar en un alto porcentaje de disminución. Por el contrario, en la zona del sur de Veracruz y Tabasco, las anomalías absolutas de precipitación pueden ser grandes pero porcentualmente no rebasan el 5%. Sin embargo, es necesario recordar que hay dos elementos importantes en la precipitación que no han sido capturados por los GCMs. Uno de ellos son los huracanes y el otro es la variabilidad de baja frecuencia en la lluvia, relacionada con las fluctuaciones decadales en el Pacífico y en el Atlántico. Las variaciones en la lluvia por tal condición pueden ser de hasta 30 a 40% con respecto al valor promedio. Por ello, las variaciones de precipitación en cambio climático tienen una señal de menor magnitud. No se piense que esto no tiene importancia, pues una disminución sistemática en la precipitación de 5 a 10% puede resultar en disminuciones mayores de disponibilidad de agua cuando se toma en cuenta el efecto de una mayor temperatura que producirá mayor evaporación.

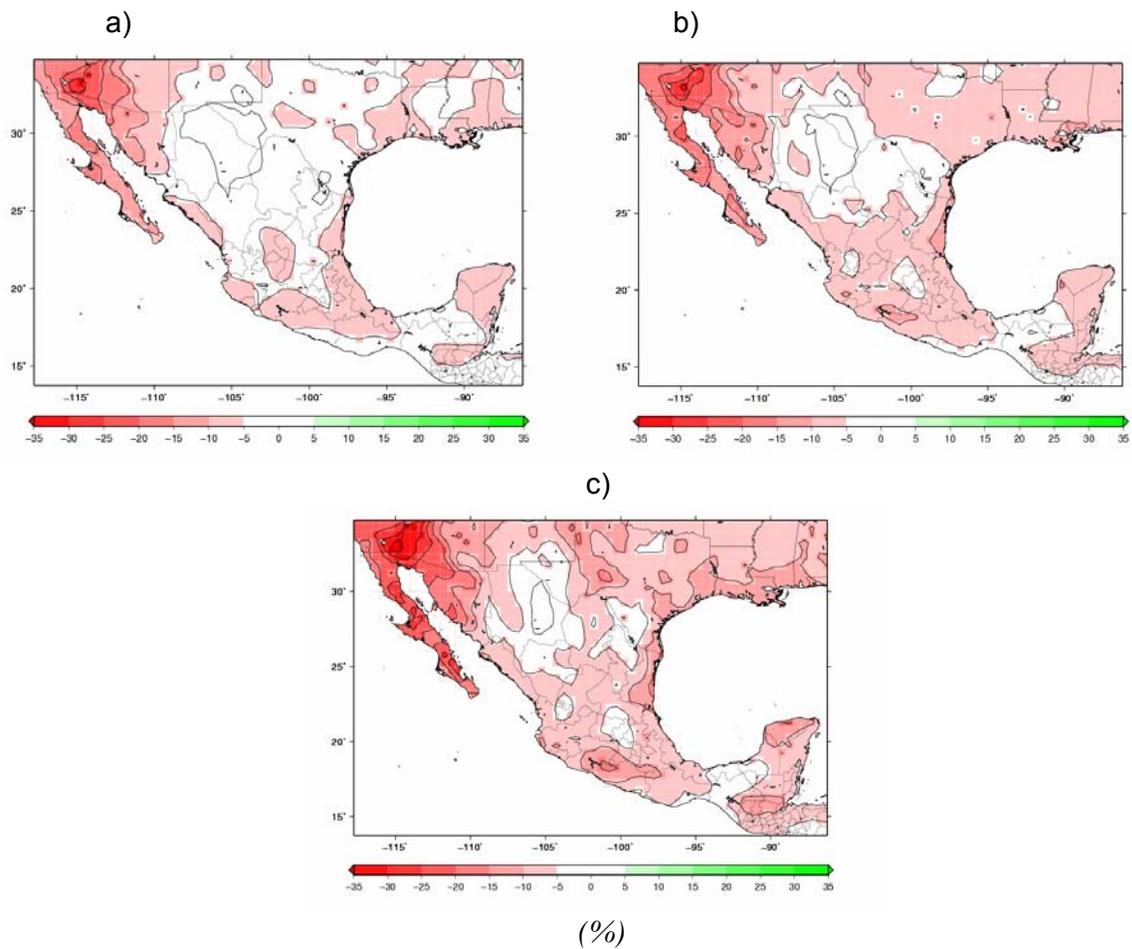


Figura 28. Como en la Fig. 24, pero para anomalía porcentual anual de precipitación.

Es interesante notar que en ciertas partes del norte de México, las anomalías promedio del ensamble son pequeñas o incluso positivas. Esta señal está presente también en algunos de los modelos numéricos utilizados por NARCCAP para el periodo de verano, en el cual se concentra el gran porcentaje de la precipitación sobre México (Fig. 29).

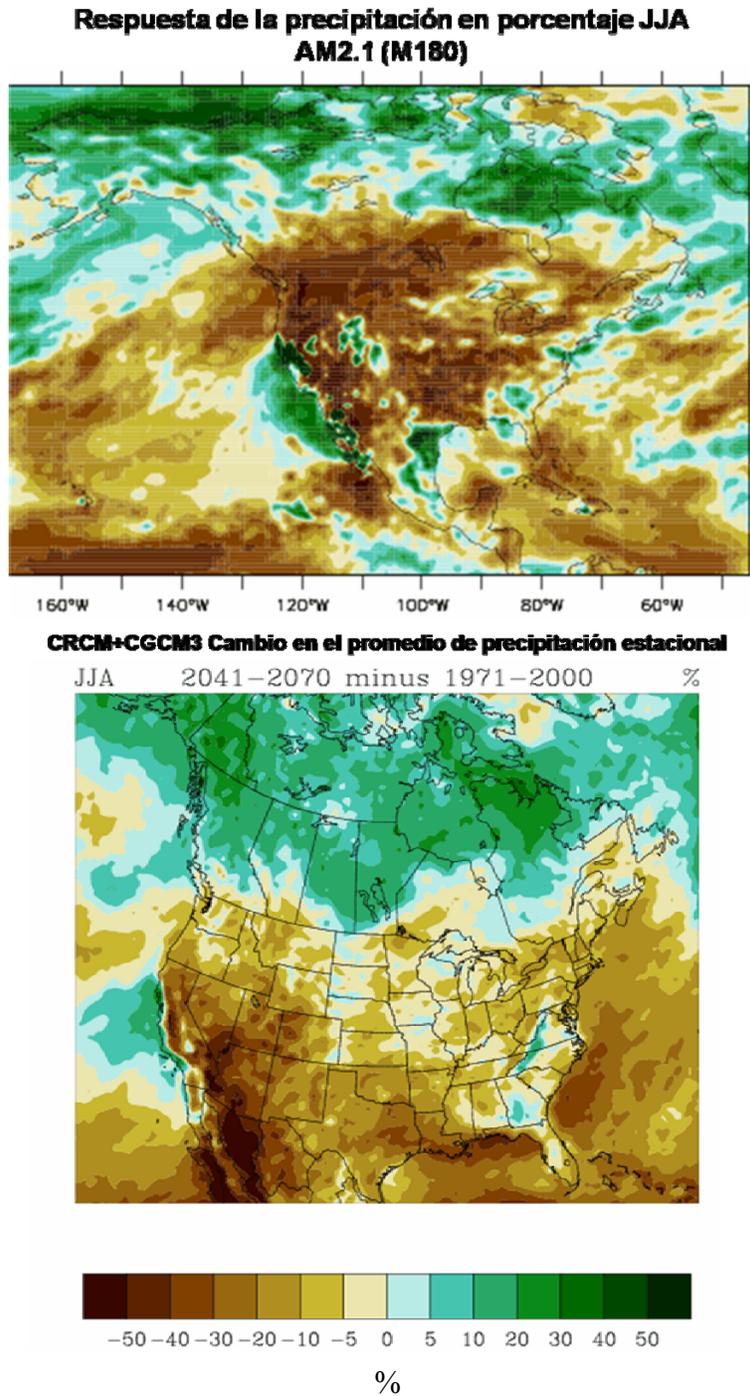


Figura 29. Como en la Fig.26 pero para anomalía (%) de precipitación.

Como en el caso de la temperatura, existe una amplia dispersión en las proyecciones CPT regionalizadas cuando se comparan los modelos usados. A diferencia del caso de la temperatura, en que la totalidad de los modelos indican aumentos, en el caso de la lluvia hay modelos que proyectan aumentos y otros (la mayoría) que sugieren reducciones, por ejemplo en el noroeste de México (Fig. 30).

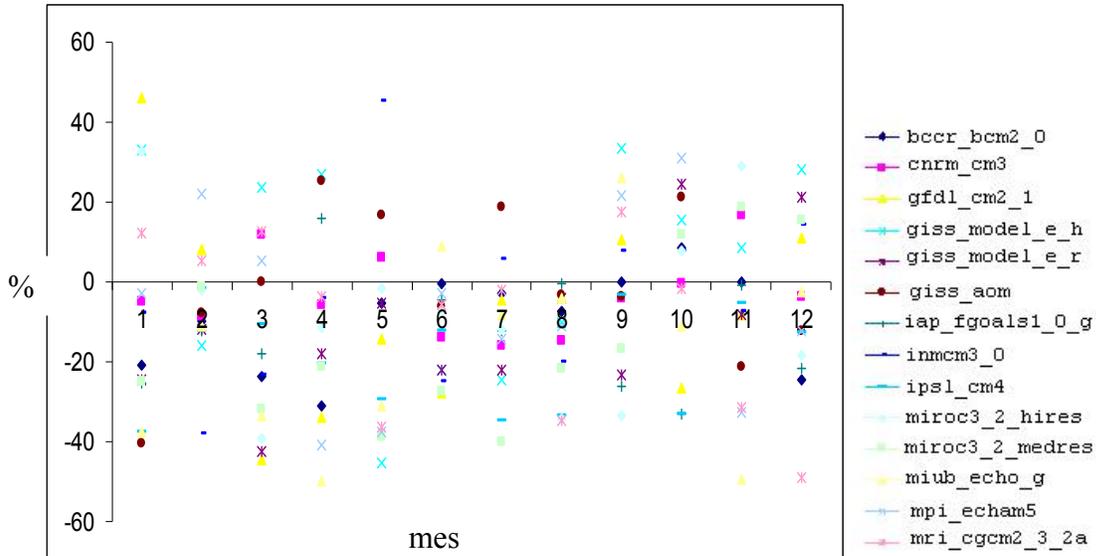


Figura. 30. Anomalía mensual de precipitación (%) bajo el escenario A1B por diferentes modelos CPT regionalizados para el noroeste de México en el periodo 2070-2099

Hasta ahora los resultados presentados corresponden a variaciones en la condición media. Sin embargo, es necesario analizar cómo cambian otros elementos de la PDF en diversos sitios de la República Mexicana, pues como se explicó anteriormente, es mediante esta representación que se puede analizar cómo serán los cambios en los eventos extremos, por ejemplo. Los resultados de este ejercicio se encuentran en la página del INE:

http://www.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/e2007o_escenarios.zip

6. Un Generador Estocástico de Tiempo Meteorológico (GETM)

Además de reducir la escala espacial de las salidas de GCMs, es necesario que los escenarios de cambio climático a escala regional posean información sobre actividad de tiempo meteorológico extremo. Para ello se requiere pasar de escenarios mensuales a información diaria. El escalamiento temporal puede ser de tipo estadístico y para ello se usan los Generadores Estocásticos de Tiempo Meteorológico (GETM). Como todos los métodos estadísticos de reducción de escala, éstos se basan en el establecimiento de relaciones empíricas entre variables de baja y alta resolución. En el escalamiento temporal la resolución deseada generalmente es diaria, derivada de campos mensuales o estacionales, aunque no necesariamente se ocupa un campo dependiente y uno independiente para establecer las funciones de transferencia, es decir, comúnmente se utilizan las estadísticas establecidas entre varios campos clave, como precipitación, radiación, temperatura mínima, máxima de los campos observados diarios y se deriva la respuesta ante cambios relativos de estas variables para alguna época del año. La información diaria generada no corresponde a un pronóstico, si no que corresponde a una condición que satisface ciertas condiciones estadísticas que fueron derivadas de las relaciones empíricas entre las variables analizadas de alta resolución, por lo que es realista, pero solo es una condición probable aleatoria.

Un GETM genera secuencias diarias realistas de variables climáticas como precipitación, temperatura máxima, mínima, humedad, etc., con las mismas características estadísticas que los datos observados para la estación o punto de malla a escalar en la proyección.

Usualmente las secuencias de precipitación son generadas primero, con diferentes relaciones para días húmedos y secos. La precipitación está dividida en un proceso de ocurrencia (e.g. si el día es húmedo o seco) y un proceso de cantidad (cantidad de precipitación en un día húmedo) muestreado al azar por una distribución apropiada. La componente estocástica en un generador de tiempo está controlada por la selección de un número al azar. Cambiando este número se obtienen secuencias de tiempo completamente diferentes (Semenov *et al.*, 1999). Esto significa que es posible generar muchas secuencias de tiempo diario de un escenario en particular. Las secuencias estadísticas de cada escenario serán muy parecidas, pero no idénticas. Dentro de las ventajas y desventajas de los GETM se tiene:

Ventajas

- La habilidad de generar series de tiempo sin límite.
- La oportunidad de obtener series de tiempo meteorológico representativas en regiones de escasa información, interpolando datos observados.
- La habilidad de alterar los parámetros del generador de tiempo de acuerdo a los escenarios de clima futuro, con la posibilidad de incorporar cambios en la variabilidad así como en los valores medios.

Desventajas

- Rara vez puede describir todos los aspectos del clima con precisión, particularmente cuando se trata de eventos persistentes.
- Diseñado para usarse independientemente en puntos individuales.

El uso de un GETM es el método más simple de obtener una gran muestra de datos diarios a partir de datos en resoluciones temporales del orden de meses. Las salidas de GCMs en resolución diaria u horaria proveen esta información pero contienen una inadecuada simulación de la variabilidad local, subestimando eventos extremos y la muestra es relativamente pequeña en la escala que tiene lugar el cambio climático. Un GETM permite evaluar probabilísticamente, posibles cambios en eventos extremos de precipitación y temperatura bajo escenarios mensuales, ya que permite generar series de datos diarios de cien años o más, para dar robustez estadística a la proyección. Con una muestra tan grande se asegura estabilidad a las estadísticas y robustez a los resultados en la evaluación de los cambios, de haber alguno. Los GETM son usados siempre que se requieran modelos de impactos en una pequeña escala. Como en cualquier método estadístico de reducción de escala, se necesitan suficientes datos observados para derivar relaciones estadísticas entre las diferentes escalas.

Los escenarios de cambio mensuales permiten inferir de forma directa la estructura diaria de los cambios esperados es decir, los eventos diarios construyen la condición mensual. Empleando un GETM se determina cómo, bajo los escenarios regionalizados mensuales, se modifican las condiciones diarias. En este trabajo se hace uso del GETM LARS (Fig. 31) (Semenov *et al.*, 1998 y 1999) (ver Anexo 1).

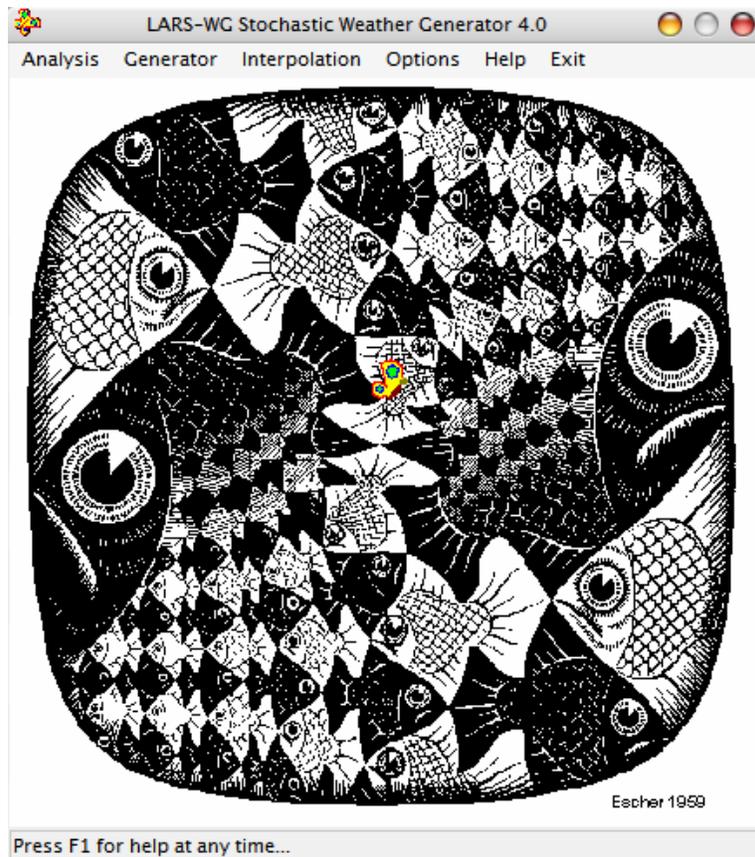


Figura 31. Pantalla de inicio del GETM LARS.

LARS genera datos sintéticos diarios para una estación o punto a partir de condiciones observadas de precipitación, temperatura máxima, mínima y radiación, en relación con condiciones mensuales (ver Anexo 1). Los datos observados disponibles para este fin están en la base de ERIC3 para las variables precipitación, temperatura mínima y máxima. El GETM LARS funciona solo con las series de precipitación diaria. Sin embargo, es recomendable utilizar todas las variables requeridas para una simulación más realista. Los escenarios mensuales se manejan como cambios relativos y absolutos respecto a las condiciones medias observadas. Los cambios en la PDF generada por un GETM permiten estimar cómo serán los cambios en las condiciones extremas (Fig. 32). Por ejemplo, la PDF de temperatura máxima bajo cambio climático provee información sobre el aumento en magnitud y frecuencia de ondas de calor (Fig. 32). De manera similar, se pueden analizar cambios en las condiciones extremas de otros parámetros meteorológicos.

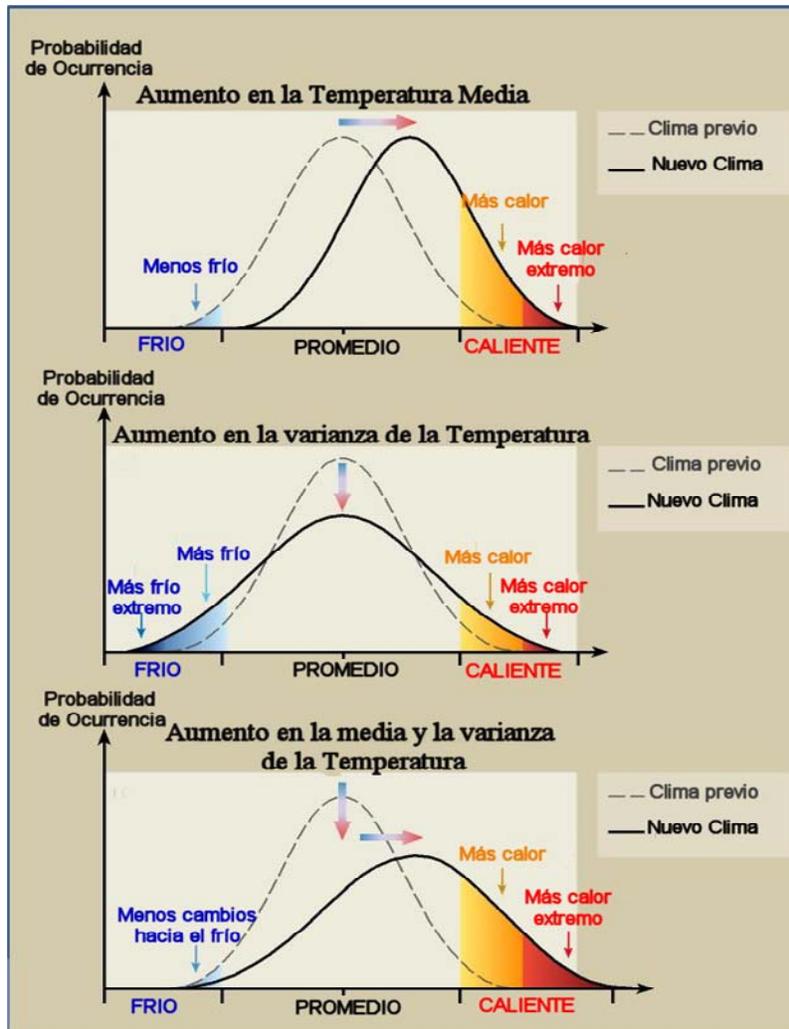


Figura 32. Cambios en la PDF de temperatura por cambio climático

A partir de los escenarios mensuales regionalizados se generan series de cien años de datos diarios con un generador estocástico de tiempo. Las estadísticas de la distribución probabilística de condiciones diarias de temperatura y precipitación se desarrollan para los periodos 2030, 2050 y 2080. Como ejemplo, se puede trabajar en las funciones de distribución de probabilidad de los valores diarios generados por LARS para la estación Mérida, Yucatán. Esta estación tiene más de 25 años de datos diarios. Existe sin embargo, la posibilidad de extenderlo a cualquier punto bajo los cuatro escenarios regionalizados: A2, A1B, B1 y COMMIT. Las funciones de distribución de probabilidad (PDFs) para las series de temperatura máxima, mínima y precipitación, permiten establecer los cambios en la actividad de eventos extremos, elemento importante al hacer proyecciones del clima futuro. Los gráficos de las PDFs se pueden preparar con un paquete estadístico para Windows, del tipo STATISTICA. Un ejemplo de los resultados que se obtienen se presenta a continuación. Considérese por ejemplo, la PDF de temperatura máxima para la ciudad de Mérida, Yucatán. De acuerdo a la condición actual, las ondas de calor (cola de 10% de la distribución) están en el rango de 40 a 44°C (Fig. 33). Sin embargo, bajo cambio climático SRES A2, las ondas de calor estarían entre 45 y 49°C hacia finales del presente siglo.

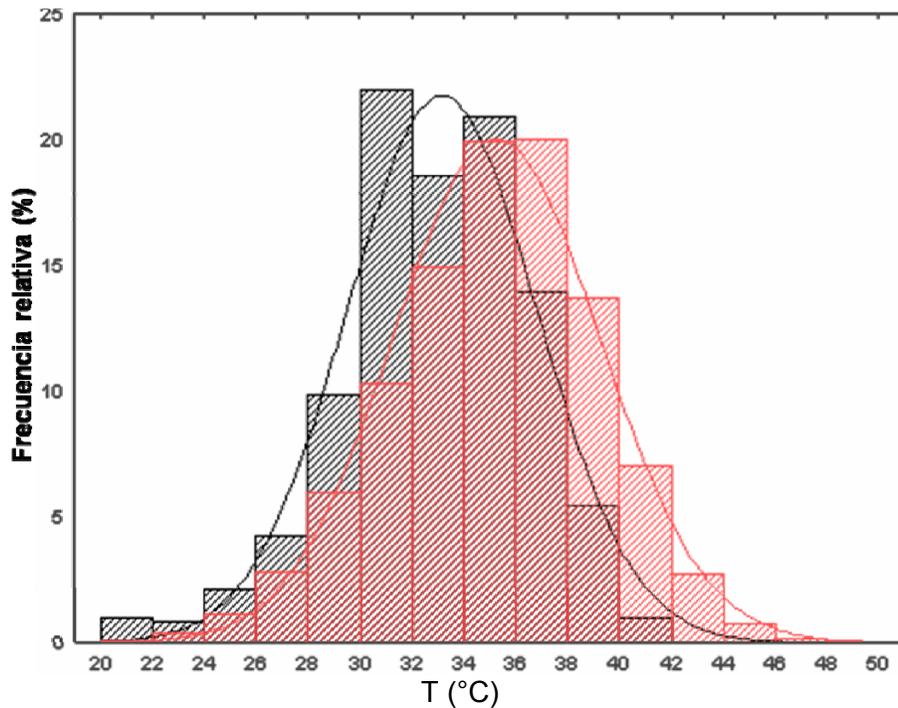


Figura 33. PDF de la temperatura máxima diaria observada (línea negra) para Mérida, Yucatán en el periodo 1970-1999, y proyectada usando el esquema LARS y el escenario A2 CPT regionalizado (línea roja) hacia finales de siglo, 2070-2099.

El uso de un GETM tipo LARS sugiere que aunque el valor medio cambia 3.5°C bajo el escenario A2 (ensamble), los valores extremos podrían aumentar en casi 4°C . Visto de otra manera, uno puede estimar que el área bajo la curva de valores mayores a 40°C bajo cambio climático ocupa ahora el 20% del área, lo que significa que las ondas de calor de esta magnitud serían el doble de frecuentes de lo que son en la actualidad.

De forma similar se puede estimar el cambio en los eventos extremos de temperatura mínima a partir de la comparación de las PDFs actual y proyectada hacia finales del presente siglo (Fig. 34). Como se ve, de continuar bajo un escenario de emisiones tipo A2, las madrugadas en Mérida podrían alcanzar valores de hasta 33°C , o dicho de otra forma, los episodios de madrugadas con temperatura mínima del orden de 30°C serían mucho más frecuentes.

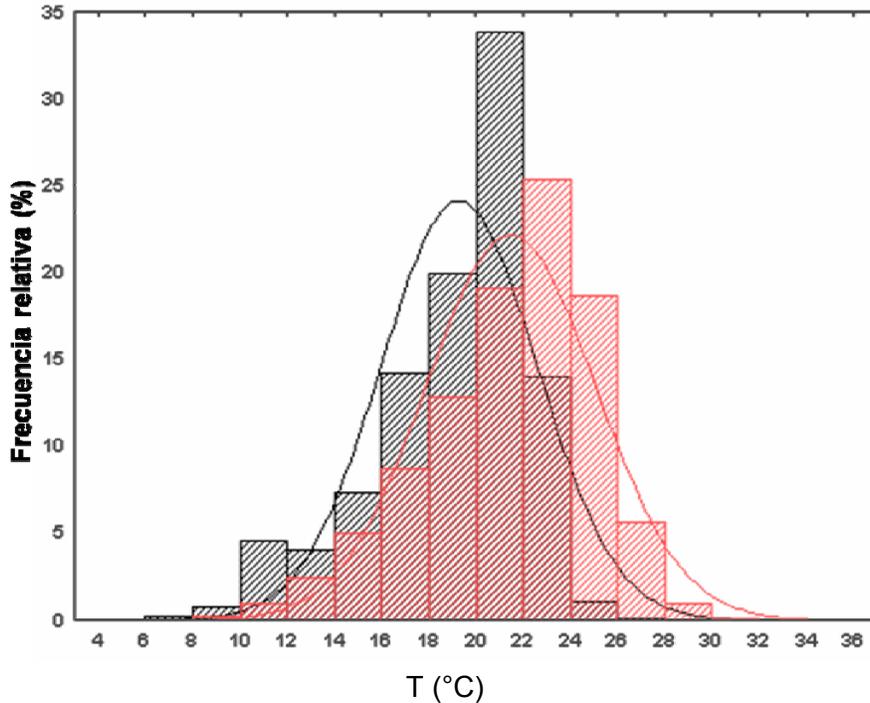


Figura. 34. Como en la Fig. 33, pero para la temperatura mínima.

Evidentemente, la PDF permite estimar muchas más cosas que el simple cambio medio de un parámetro meteorológico. En particular, se pueden estimar probabilidades de que se cumpla alguna condición en particular. Quizá una de las condiciones futuras de la que más se ha hablado es que los eventos de precipitación intensa se vuelvan más fuertes. Por ejemplo, considérese la estación Siquirichic en Chihuahua y la PDF de la precipitación diaria bajo la condición actual y futura, hacia finales del presente siglo (Fig. 35). Se tiene que la proyección bajo cambio climático indica que las lluvias bajas y medias (menos de 20 mm/días) tienden a disminuir. Sin embargo, las lluvias intensas, el extremo de la derecha de la PDF la frecuencia se incrementa ligeramente.

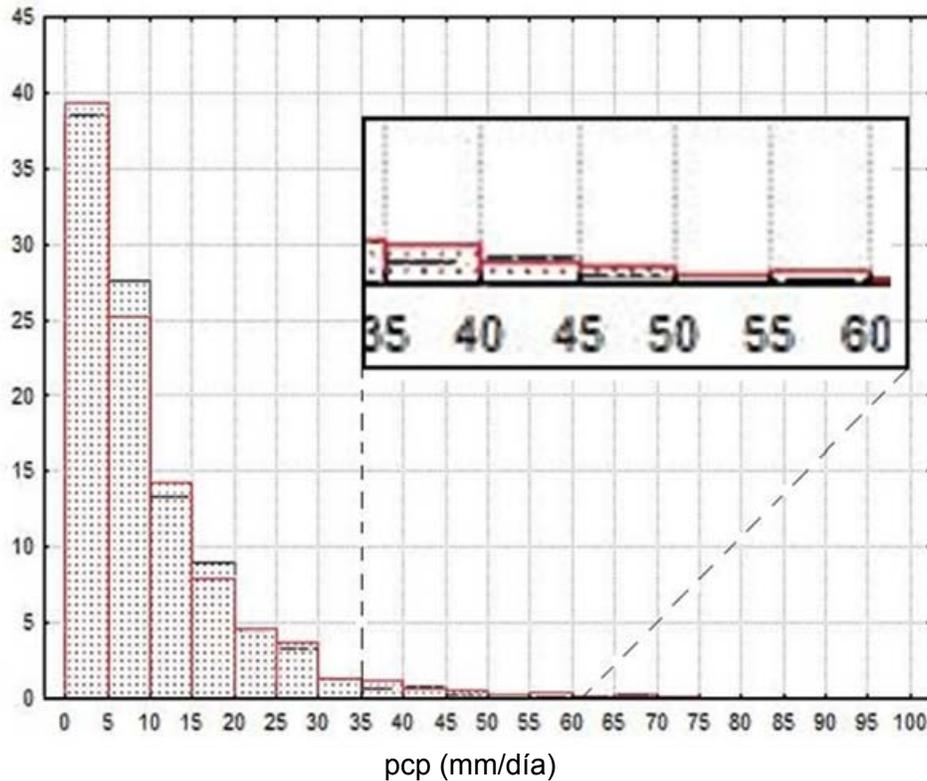


Figura 35. PDF de precipitación acumulada diaria para la estación Siquirichic, Chihuahua observada (línea negra) y proyectada a finales de siglo bajo el escenario A1B (línea roja).

Una vez que se cuenta con esquemas para proyectar el clima se está en mejor posición para estimar los impactos que este puede tener en diversos sectores socioeconómicos del país, en regiones o en grupos sociales. Es claro que utilizar las probabilidades de la amenaza, a partir de las proyecciones del PDF por ejemplo, requiere proyectar también la vulnerabilidad, o al menos tener una primera estimación de ésta en la actualidad y bajo esquemas de adaptación para poder tener estimaciones de riesgo a futuro.

7. Ejemplos para la evaluación de impacto y vulnerabilidad

La estimación de impactos en algún sector, requiere de conocimiento de las causas de la vulnerabilidad y una idea de cómo evoluciona ésta. En combinación con las probabilidades de amenaza bajo cambio climático se puede construir una primera aproximación del riesgo, que debe ser gestionado bajo esquemas de adaptación.

7.1 Cambio climático y agricultura

La agricultura es uno de los sectores que se verá afectado en gran medida por los cambios en el ciclo hidrológico. Un estudio de variabilidad climática y agricultura en el Bajío, indica en qué regiones se puede contar con condiciones adecuadas para el maíz, por ejemplo. Es claro que los cultivos de temporal e incluso de riego se tienen en las zonas en donde la precipitación es suficiente (Fig. 36), pero además, en donde la temperatura no rebasa en promedio anual los 32°C, condición sugerida como propicia para ciertas variedades de maíz.

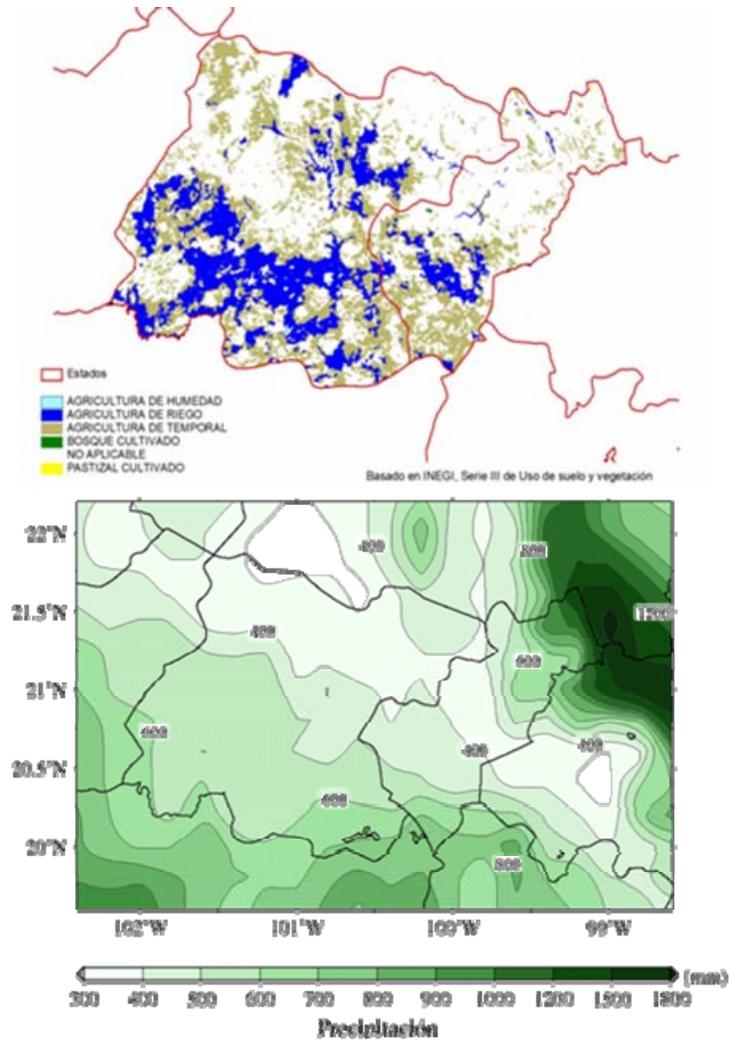


Figura 36. Zonas agrícolas del Bajío (área azul) y precipitación media anual.

Empíricamente se encontró que los agricultores de temporal garantizan un mínimo de rendimiento si al menos llueven 460 mm en la temporada de primavera-verano (Fig. 37). Es claro que las mayores probabilidades de que no se cumpla la condición se encuentran en la zona semiárida del norte de Guanajuato y centro de Querétaro. Usando los registros históricos de lluvia para la región se puede obtener la probabilidad de que la lluvia estacional sea menor a 460mm. Es claro que en la zona árida del bajo, las probabilidades de ello son mayores.

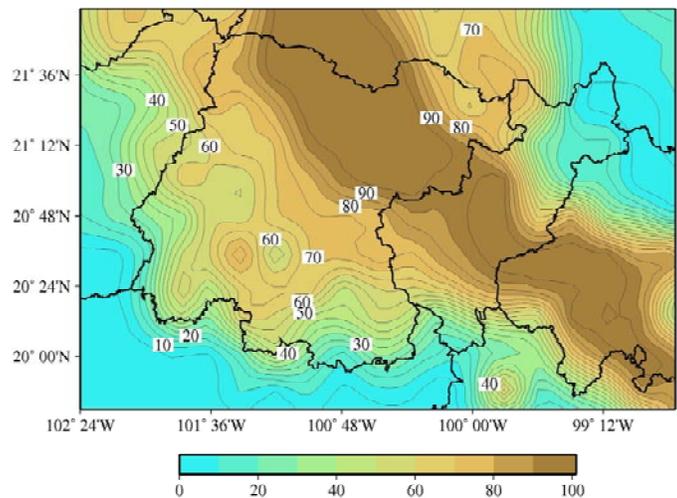


Figura 37. Probabilidad de que la precipitación esté por debajo de 460 mm entre junio y julio en el Bajío Mexicano.

En realidad lo importante es la humedad que hay en el suelo (Fig. 38), que refleja en gran medida la combinación de condiciones de precipitación y temperatura, resulte adecuada para la agricultura del maíz.

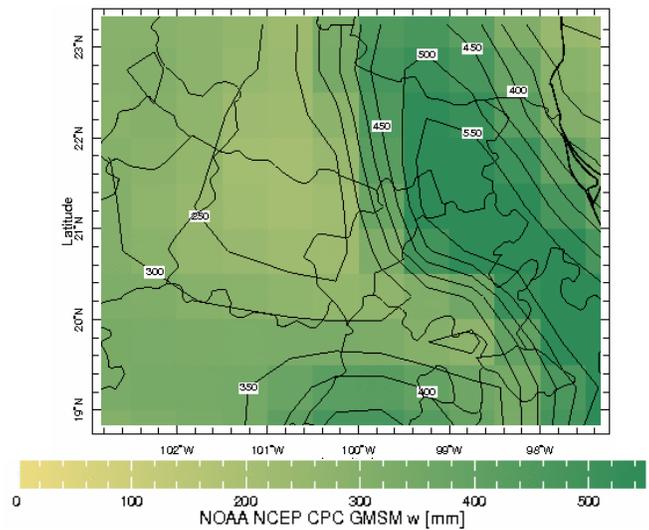


Figura 38. Humedad del suelo en julio de 1988

Usando los escenarios de cambio climático, se puede estimar que la reducción en precipitación para el 2030-2050 sea del orden de 5 a 10% en la zona del Bajío con lo cual, la zona en donde ya no se tendría el mínimo de precipitación necesaria para el cultivo del maíz de temporal será menos adecuada. Más aun, el aumento en temperatura resultaría en una disminución de humedad en el suelo que crearía un mayor estrés hídrico en el cultivo (Fig. 39). De acuerdo al presente análisis, algunas zonas del centro de Guanajuato y Querétaro perderán posibilidades de mantener agricultura de temporal.

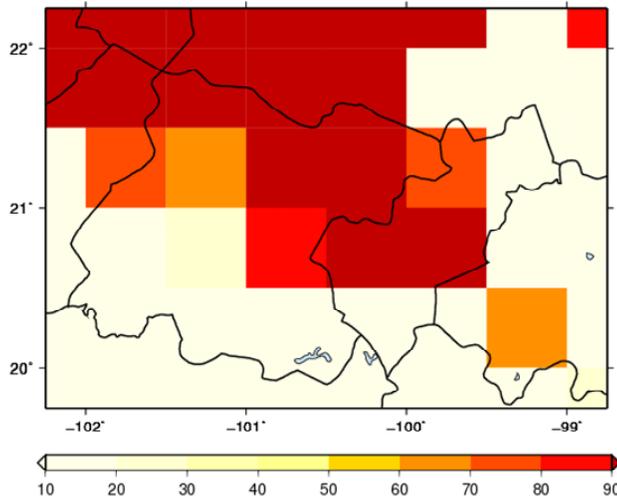


Figura 39. Probabilidades de que la humedad de suelo (solo forzado por aumento en temperatura) en los meses Junio-Octubre bajo el escenario A2 en el periodo 2040-2069 se encuentre por debajo del 60% de anomalía porcentual (línea base 1970-1999).

7.2 Cambio climático y los ecosistemas

Uno de los potenciales efectos del calentamiento global, será la pérdida de bosques debido a incendios forestales. La condición de gran número de incendios se relaciona con las prácticas de roza, tumba y quema usadas en la agricultura. Tal práctica hace que los ecosistemas sean altamente vulnerables durante periodos de secas. El cambio climático proyecta un aumento en el estrés hídrico de los ecosistemas debido a la pérdida de humedad en el suelo y el posible retraso de las lluvias en primavera.

Si se usa CPT para relacionar los campos de temperatura con un indicador de salud de la vegetación como lo es el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), se pueden proyectar patrones de cambios en la salud de la vegetación ante aumentos de temperatura y reducciones en la precipitación (Fig. 40).

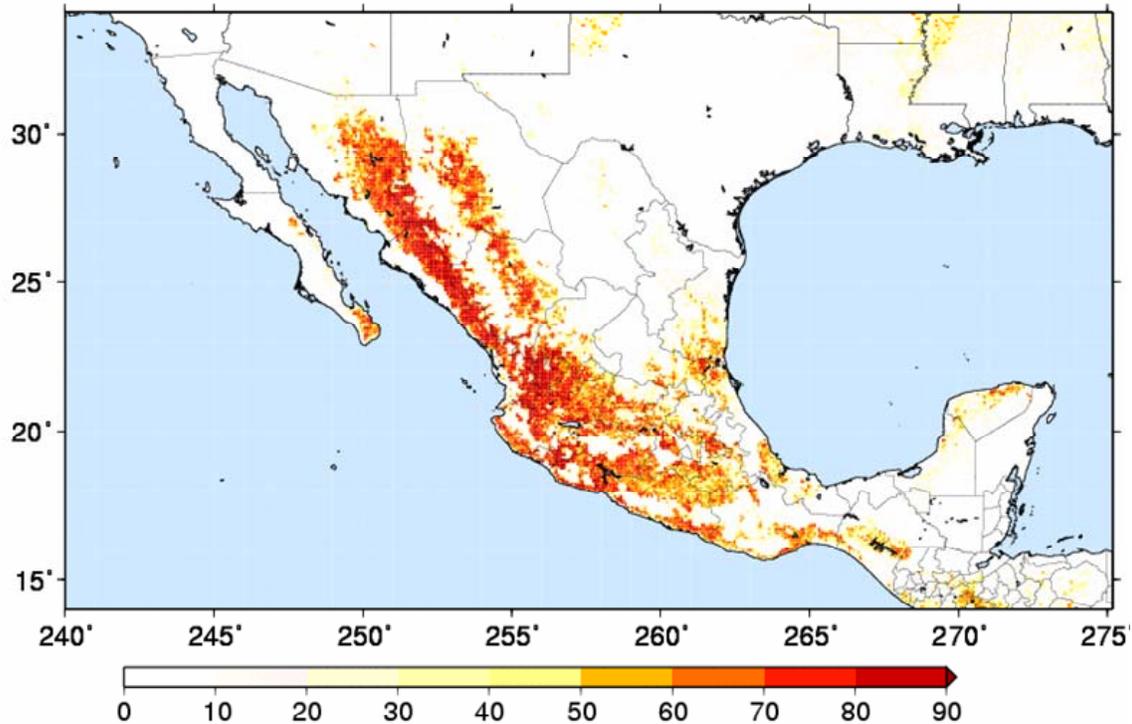


Figura 40. Probabilidades de que la anomalía de NDVI en JJASO se encuentre por debajo de 30% bajo el escenario A2 en el periodo 2070-2099 en México

Una anomalía de cerca del 30% del valor normal de NDVI se presentó en gran parte del país en la primavera de 1998 asociada con condiciones de sequía por El Niño (Fig. 41). En esa ocasión se rompieron todos los récords en cuanto a número de incendios forestales en México. Aunque se viene trabajando en materia de control del fuego, en muchos lugares hay aun una tendencia a que año con año, este desastre sea más frecuente y afecte grandes extensiones de bosque, con la consecuente pérdida de biodiversidad.

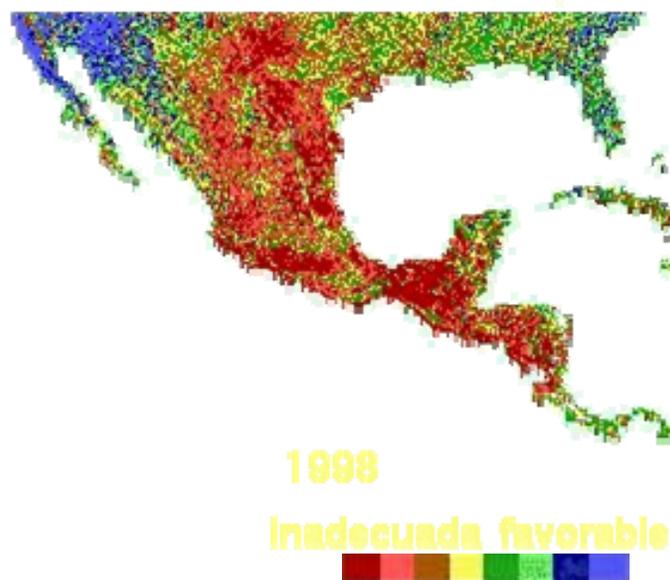


Figura 41. Anomalía de NDVI durante la primavera de 1998.

Por ello, el cambio climático incrementa el riesgo de pérdida de bosques, a menos que se actúe en contra de prácticas tradicionales de manejo de fuego y cambio de uso de suelo que amenazan a los bosques.

7.3 Cambio climático y salud

Uno de los sectores que también se ve afectado por eventos extremos del clima es el de la salud. Desde hace ya varios años resulta claro que muchas de las afectaciones que experimenta la población están relacionadas con episodios de frío intenso, de calor extremo o de lluvias que llevan a inundaciones, por mencionar algunos. En realidad, analizar los efectos del clima en la salud requiere de conocimiento profundo sobre los factores relacionados con las epidemias, es decir con los factores de vulnerabilidad de la población (Fig.42).

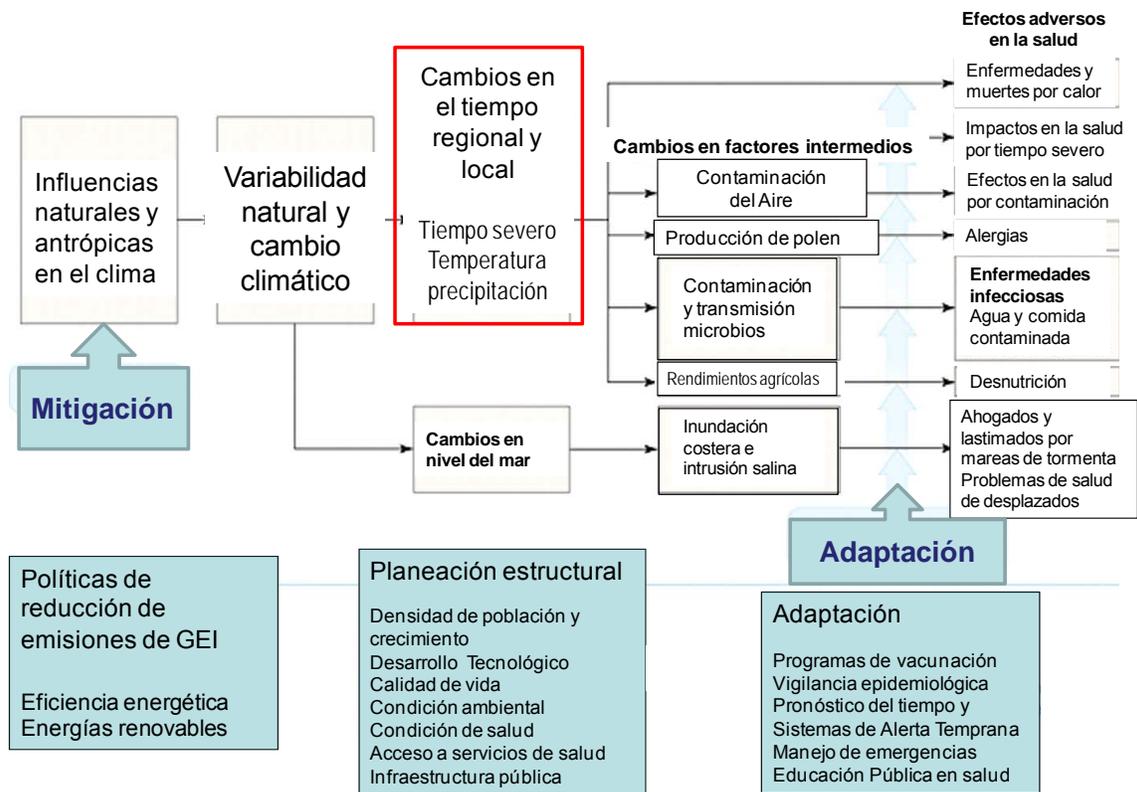


Figura 42. Diagrama de relaciones clima salud

En general, las condiciones extremas de frío o calor pueden afectar directamente la salud. Entre abril y julio se incrementan los riesgos para la salud y aumentan los efectos asociados a la exposición a altas temperaturas, como son el "golpe de calor", la insolación, las lesiones dérmicas y las enfermedades diarreicas agudas (Fig. 43). Una persona con "golpe de calor" e insolación presenta, entre otros síntomas, un incremento súbito de la temperatura corporal, confusión mental y desorientación, y debe ser atendida de inmediato en cualquier unidad de salud. Las autoridades sanitarias recomiendan diversas medidas de prevención ante ondas de calor, como el consumo de líquidos que eviten la deshidratación y vestir ropa adecuada para protegerse de la radiación solar, entre otras. Usando los resultados de la Fig. 33, la frecuencia de ondas de calor seguirá aumentando, tanto en intensidad como en frecuencia, y la probabilidad de que ocurran temperaturas por encima de 35 °C, para el caso de Mérida es la mitad del tiempo hacia finales de siglo. Los cambios en el tiempo pueden afectar también la calidad del aire y de esa manera indirecta, el clima altera la salud. El clima también puede alterar la producción de alimentos, de agua y de forma indirecta afectar la salud de la población.



Figura 43. Impactos de ondas de calor

Ante esto, habrá que comenzar a pensar en cómo se trabaja con la población para prepararla, cómo se diseñan nuevas construcciones que no requieran de tanto aire acondicionado, cómo se trabaja con los proveedores de alimentos para que se conserven más tiempo, qué impacto tendrá este cambio en la temperatura máxima en el sector turismo. Es necesario entonces, diseñar una estrategia de trabajo con las partes interesadas para desde ahora, reducir vulnerabilidad ante ondas de calor, en Mérida y el resto del país.

8. Conclusiones y recomendaciones

El cambio climático es la mayor amenaza ambiental del presente siglo. Los países han reconocido que se trata de un problema de gestión de riesgo en el que se debe trabajar en reducir su magnitud mediante la mitigación, pero al mismo tiempo se debe comenzar a actuar para ser menos vulnerables, mediante acciones de adaptación. Una de las formas en que se cuantifica el riesgo es a través de modelos, que son una representación aproximada de la realidad. En particular, los modelos del clima han permitido estimar cómo podría cambiar el clima de continuar las tendencias al consumo desmedido de combustibles fósiles. Los GCMs permiten así, estimar en cuánto cambia la temperatura global del planeta, dependiendo de los patrones de desarrollo global que se sigan en las décadas por venir.

Para estimar impactos del cambio climático en regiones, sectores o grupos sociales, es necesario reducir la escala de la información con la que generalmente trabajan los GCMs, mediante un proceso conocido como *downscaling*. La reducción de escala puede ser estadística, construyendo funciones de transferencia, o dinámica, usando modelos numéricos de mesoescala conocidos como modelos de clima regional. La opción estadística resulta más práctica por su simplicidad, lo que permite reducir la escala de un gran número de modelos produciendo escenarios probabilísticos por ensamble

multimodelo. Una de las opciones que se tiene es el uso del CPT es que compara patrones espaciales para corregir errores sistemáticos de los GCMs, a partir de una comparación con campos observados de alta resolución espacial. CPT compara adecuadamente con técnicas de reducción de escala dinámicas, lo que genera confianza en los escenarios. Es por ello que se recomienda su uso en una plataforma tipo LINUX/Unix, para lograr reducir la escala del mayor número de realizaciones y con ello dar robustez estadística a la PDF de las proyecciones del clima.

Dado que la mayoría de las salidas disponibles de escenarios de cambio climático del IPCC poseen escala temporal mensual, se recomienda el uso de un generador estocástico de tiempo meteorológico, modulado por cambios mensuales en la temperatura, para estimar cambios en la PDF de temperatura o lluvia, principalmente de eventos extremos. Así, se puede completar la información que proporcionen los escenarios a no sólo cambios en la media, sino en la variabilidad y los extremos.

Debe siempre considerarse que el conocimiento que se tiene de el clima, está en cierta medida dado por los avances en materia de monitoreo. Históricamente, las redes de información climática de México, no poseen una alta densidad espacial, por lo que intentar sacar conclusiones sobre el clima a escalas menores a la distancia media entre estaciones resulta arriesgado. Más aun, intentar generar escenarios de cambio climático de muy alta resolución espacial (< 10 km X 10 km) puede ser solo una fantasía, pues la incertidumbre asociada será tan grande o mayor incluso que la señal misma proyectada. La reducción de escala no es solo un proceso de interpolación, sino que requiere de un conocimiento de los procesos que modulan el clima a escala regional y por lo menos una idea de cómo cambiarán estos bajo cambio climático.

Finalmente, debe transitarse de un esquema en el que el encargado de generar escenarios produzca información de cambios en las condiciones medias para periodos específicos, a un sistema de información en el que el evaluador del riesgo pueda obtener información de los datos para estimar el riesgo. En otras palabras, es necesario que el encargado de producir escenarios de impactos, defina los umbrales críticos de cambio y las probabilidades de que se den a diversos plazos, para que se pueda realizar una propuesta de gestión de riesgo, es decir de adaptación. Las prácticas de dar un valor determinístico de cambio en el clima han quedado atrás para realmente generar información sobre las probabilidades de que ocurran cambios peligrosos. En diversos sectores de México, es necesario establecer que significa un cambio peligroso en el clima, para saber con qué velocidad debemos actuar en la adaptación.

Los escenarios regionales de cambio climático actúan como enlace entre los generadores de información del clima y los encargados de proponer estrategias de adaptación. Como en muchos otros casos, el problema de cambio climático es un problema de gestión de riesgo y requiere de una aproximación de toma de decisiones con base en información probabilística. Dicho estrategia ha sido poco empleada en problemas de clima en México, pero debe emplearse, tanto en planeación con base en pronósticos estacionales del clima como en plazos mucho mayores. Neri (2004) ha desarrollado un ejemplo de cómo puede usarse información climática de pronóstico estacional para toma de decisiones en el sector agricultura. Un análisis más profundo de diversos métodos para aprovechar información climática se encuentra disponible en la página del *International Research Institute (IRI) for Climate and Society* (<http://portal.iri.columbia.edu/portal/server.pt>).

9. Bibliografía

Allen, M. R, B. B. Booth, D. J. Frame, J. M. Gregory, J. A. Kettleborough, L. A. Smith, D. A. Stainforth & P. A. Stott, 2004: Observational constraints on future climate: distinguishing robust from model-dependent statements of uncertainty in climate forecasting. Contribution to the IPCC Workshop on Communicating Uncertainty and Risk. 3 pp.

Dickinson, R.E., 1995: *Land Surface en The Climate System Modeling*. K. Trenberth editor. The University of Cambridge. 149-173.

Glahn, H. R., and D. A. Lowry, 1972: The use of Model Output Statistics (MOS) in objective weather forecasting. *J. Appl. Meteor.*, 11, 1202-1211 pp.

Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis, 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978

http://www.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/e2007o_escenarios.zip

IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Parry, Martin L., Canziani, Osvaldo F., Palutikof, Jean P., van der Linden, Paul J., and Hanson, Clair E. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1000 pp.

Meehl, G. A., T. F. Stocker, W. D. Collins, P. Friedlingstein, A. T. Gaye, J. M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J. M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, L. G. Watterson, A. J. Weaver & Z.-C. Zhao, 2007: Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Nebojsa N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T. Y. Jung, T. Kram, E. Lebre La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor, Z. Dadi, 2000: *Special Report of Emissions Scenarios (SRES)*. Informe especial para IPCC.

Neri Vidaurri Carolina, 2004: *Evaluación del Riesgo en el Sector Agrícola por la Variabilidad Climática*, Tesis de Licenciatura en Geografía. UNAM – Facultad de Filosofía y Letras (disponible en internet).

Parry, M. and T. Carter, 1998: *Climate impact and adaptation assessment. A guide to the IPCC approach*. Earthscan Publication, London, 166 pp.

Reifen, C., and R. Toumi (2009), Climate projections: Past performance no guarantee of future skill?, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L13704, doi:10.1029/2009GL038082.

Richardson, D. S. 2000: Skill and relative economic value of the ECMWF ensemble prediction system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 126, 649-668

Semenov, M. A., R. J. Brooks, E. M. Barrow & C. W. Richardson, 1998: Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climate. *Climate Research*. 10: 95-107 pp.

Semenov M.A. & Brooks R.J. (1999): Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain. *Climate Research* 11, 137-148.

Wilby, R. L. & T. M. L. Wigley, 2000: Precipitation predictors for downscaling: observed and general circulation model relationships. *International Journal Of Climatology*. 20: 641-661 pp.

Wilby, R.L., Dawson, C.W. and Barrow, E.M. (2002): SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling Software*, 17, 145-157 pp.

Wilby R. L., S. P. Charles, E. Zorita, B. Timbal, P. Whetton., L. O. Mearns, 2004: Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods. 27 pp.

Wilks, D. S. & R. L. Wilby. 1999. The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography*. 23(3): 329-357 pp.

Pérez, E., J.M. Méndez, and V. Magaña, 2007: High Spatial Resolution Climate Change Scenarios for Mexico Based on Experiments Conducted with the Earth Simulator. In *Visualizing Future Climate in Latin America: Results from the application of the Earth Simulator*. Edited by The World Bank. 90 p.

Agradecimientos

El presente trabajo se basa en los desarrollos realizados en material de Modelación del Clima Regional realizados por el M. en C. David Zermeño. Gracias a su ayuda, ha sido posible entrar a una nueva forma de analizar las salidas de los GCMs. Agradezco también el apoyo en la revisión del manuscrito realizado por el LCA Uriel Bando y la Geógrafa. Carolina Neri.

Anexo 1

USO DE LARS-WG

1.- ¿Qué Necesito antes de trabajar con LARS?

Sobre la Computadora: *Lars* preferentemente debe ser instalado en versiones *windows* anteriores a *VISTA*, es recomendado *windows XP*.

Sobre los Datos: Se necesitan dos tipos de datos:

1.- Datos observados diarios. Estos los encuentra en la carpeta llamada *Datos_Estados*.

Descripción: Esta información esta dividida por estados, los nombres de los archivos corresponde a la clave asignada por el Servicio Meteorológico Nacional. Son dos tipos de archivos por cada estación, archivo de metadatos (terminación .st) y archivo de datos (archivo .sr). Son datos de Precipitación temperaturas mínimas y máximas extraídas de la base de datos *ERIC III*. La información (en los archivos de datos) está organizada en columnas empezando por año y día juliano, por lo que puede ser utilizada para cualquier otro propósito diferente de *Lars*.

2.- Datos de escenarios de mensuales. Estos los encuentra en la carpeta llamada *Datos_Escenarios*.

Descripción: Son los datos de los escenarios regionales de cambio climático para México. Los archivos contienen datos de cambio de relativos temperatura mensuales (Enero a Diciembre) para cada punto de una malla de de 55 km X 55 km (terminación .sce). En el nombre de los archivos se muestra la longitud y latitud del punto de malla al que se hace referencia y describe su referencia de escenario y periodo con la siguiente clave:

25: Periodo 2010-2039

50: Periodo 2040-2069

75: Periodo 2070-2099

B: escenario A2

C: escenario A1B

Así el archivo *25-100.25B20.25.sce* es para el punto de malla (*longitud=-100.25, latitud=20.25*) bajo el escenario A2 y para el periodo 2010-2039.

Para más detalles sobre la estructura de los archivos, una vez instalado *Lars*, valla a la sección de ayuda en el subtema *Site Generator*.

NOTA: Todos los archivos son tipo texto sin importar su terminación, por lo que para ver el contenido debe dar click derecho sobre el archivo deseado y luego seleccionar abrir con/ word pad.

2.- Instalando LARS

En la carpeta *Programas* encontrará un archivo llamado *UpdateLARSWG*, dé doble click sobre él y siga las instrucciones. Este proceso es muy simple, basta con dar click sobre el botón *siguiente* y *aceptar* cuando así se requiera.

Una vez terminado este proceso debe ir a la carpeta *C:/Archivos de Programa* y ahí encontrará una carpeta llamada *LARS*. Dentro de esta carpeta se encuentra el archivo ejecutable *larswg.exe*, dé doble click sobre el y habrá iniciado la sesión.

3.- Configurando su ambiente de trabajo

Una vez iniciada la sesión es necesario configurar las carpetas en las que *Lars* trabajará, esto es, donde se tomarán los datos de entrada y donde se pondrán los datos de salida. Para hacer esto de click en el botón *options*, y a continuación ponga las rutas adecuadas en las cajas de dialogo que le aparecen (Fig. A1), para esto, siga los siguientes pasos.



Figura A1. Caja de opciones de Lars.

Paso 1.- Abra su carpeta de datos observados (*Datos_Estados*) y seleccione el estado con el que vaya a trabajar, copie y pegue la ruta de esta carpeta en la caja que dice *Site Analysis*. Asegurarse de colocar el símbolo al final de la ruta.

Paso 2.- Abra su carpeta de escenarios (*Datos_Escenarios*), copie y pegue la ruta de esta carpeta en la caja que dice *Generator*. Asegurarse de colocar el símbolo al final de la ruta.

Paso 3.- Debe crear una carpeta con el nombre y ruta de su preferencia para que *Lars* deposite ahí los escenarios diarios, copie esta ruta y pegue en *Output*. Asegurarse de colocar el símbolo al final de la ruta.

Paso 4.- En este punto es recomendable reiniciar su equipo.

4.- Generando Escenarios de Cambio Climático

Para generar las muestras sintéticas diarias bajo escenarios de cambio climático siga los siguientes pasos:

Paso 1.- Inicie sesión con *Lars* (De click en C:/Archivos del Programa/LARS/larswg.exe).

Paso 2.- Calibración. Dé un click en la ventana *Site Analysis*. De doble click en la barra blanca (Fig. A2), valla a su carpeta *Datos_Estados* y busque la estación con la que desea calibrar el modelo, cuando la encuentre presione *enter*. A continuación de un click sobre la segunda imagen de izquierda a derecha mostrada en la caja *Site Analysis* mostrada en la figura A2 (Botón: *Run Site analysis*).

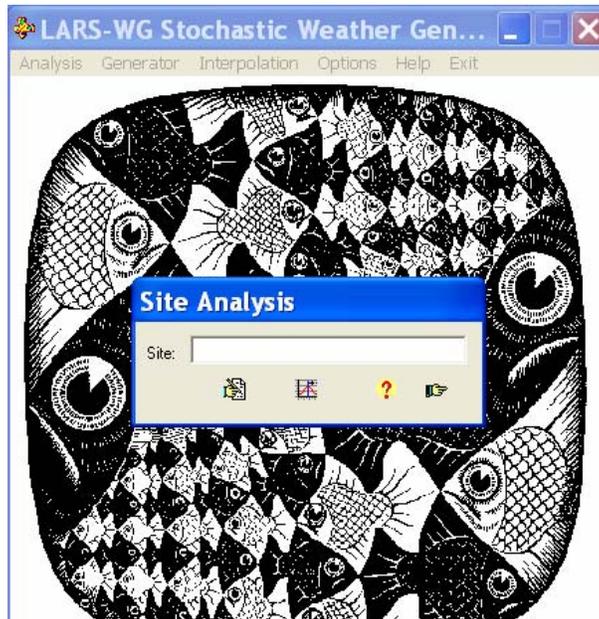


Figura A2.- Caja de opciones para seleccionar una estación.

Si todo no hubo error un letrero diciendo *That's all folks* debe aparecer. Ocasionalmente aparece un mensaje de error señalando inconsistencias en los datos observados; el más común es por ejemplo: temperatura mínima más grande que temperatura máxima, o viceversa. Estos errores se encuentran en la base de datos *ERIC III* y *Lars* los omite en el análisis así como los valores -99 (bandera de NODATO).

En este punto *Lars* ha calculado estadísticas clave sobre la variabilidad de la estación bajo análisis, los resultados los puede ver en los archivos de nueva creación con terminación *.sta* y *.wg* en la carpeta de la ruta mostrada en *options/Site Analysis*.

Paso 3.- Validación. De click en la ventana *Analysis* y luego en *qtest*, automáticamente aparecerán las estaciones para las cuales se hizo el paso 1. De click en cada una ellas. En este proceso se determina si las muestras sintéticas generadas por *Lars* son estadísticamente diferentes de los datos observados.

Paso 4.- Generando Muestras Diarias Bajo Cambio Climático. De un click sobre la ventana *Generator* y seleccione *Site*, la siguiente caja debe aparecer:

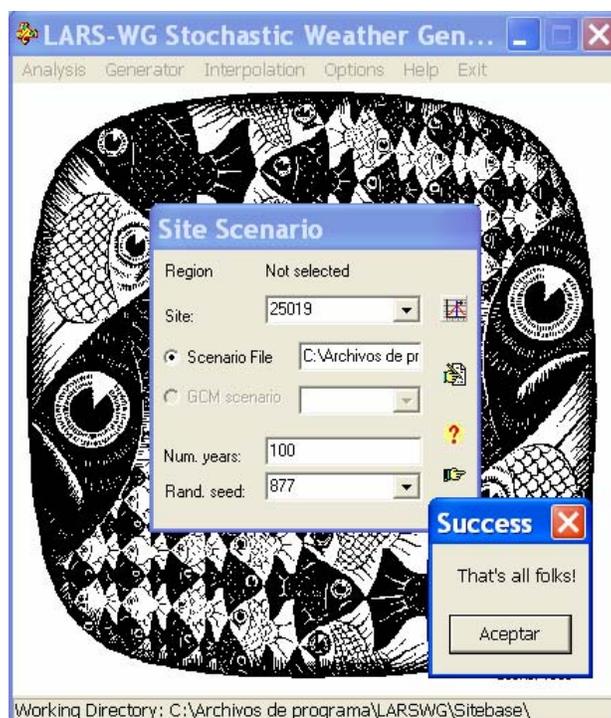


Figura A3.- Caja de opciones para generar datos sintéticos diarios bajo cambio climático.

Siga las siguientes instrucciones:

- i) En *Scenario File* dé doble click y seleccione el escenario mensual (carpeta Datos_Escenarios) con el que quiera derivar los escenarios diarios. Sea cuidadoso al escoger el escenario de tal manera que este sea el más cercano a la estación.
- ii) En *Num years* ponga una muestra suficientemente grande como 100 años, recuerde que se busca darle robustez estadística.
- iii) En *Rand seed* escoja cualquier numero, es la raíz estocástica del proceso.
- iv) De click en *Run Generator*, debe aparecer *That's all Folks* (Fig. A3).

Se han creado 100 años de muestras diarias de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación con las características de la estación pero bajo las condiciones anómalas de temperatura bajo cambio climático. Los datos están en la carpeta de la ruta *options/Output* y tienen la terminación *.dat*; sus nombres mezclan el nombre de la estación y el del escenario con los cuales fueron generados.

5.- Analizando las Salidas, Algunos Ejemplos

Una vez realizado los pasos anteriores para una o varias estaciones, ya se dispone de una base de datos diarios bajo cambio climático suficientemente robusta para empezar el análisis. Las bases de datos pueden llegar a ser muy grandes e incluso no ser soportadas por los paquetes tradicionales de manejo de datos como *Excel*, por lo que es necesario hacer uso de diferentes herramientas de computo.

Es recomendado el software *Statistica* sin embargo, cualquier programa, aplicación o técnica que calcule funciones de distribución de probabilidad (PDF) será de la misma

utilidad para los siguientes propósitos. También se recomienda hacer uso de algún lenguaje de programación para agilizar los cálculos y de algún graficador de mapas.

Ejemplo 1.- Cambios en la variabilidad de la temperatura diaria.

En este ejemplo, se muestra como calcular los cambios en la PDF de temperatura mínima, máxima o precipitación bajo cambio climático con los datos generados por *Lars*.

Paso 1.- Calcular la PDF de temperatura para alguna estación. De la carpeta *Datos_Estados* seleccione algún estado y luego alguna estación de interés, recuerde seleccionar. En este ejemplo se tomaron los datos de temperatura mínima de la estación de Siquirichic de Chihuahua.

Con *Statistica 7.0* se exporto el archivo *.sr* de la estación seleccionada, este programa tiene un manejo de datos por renglones y columnas similar a *Excel*, por lo que resulta muy familiar e intuitivo para la mayoría de usuarios nuevos. *Statistica* tiene un modulo diseñado para ajustar PDF de diferentes tipos a los datos. Se tomo la serie de datos de temperatura mínima y se le ajusto una curva tipo Normal. Se usan frecuencias relativas.

Paso 2.- Se hizo el procedimiento anterior para los datos generados por *Lars* para el escenario A2 en el periodo 2070-2099.

Paso 3.- Se sobrepusieron ambas graficas, PDF observado (líneas negras de la Fig. A4) y PDF proyectado (líneas rojas de la Fig. A4).

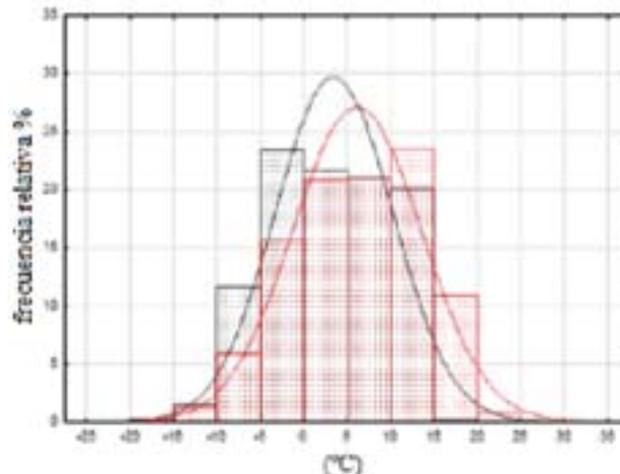


Figura A4. PDF de temperatura mínima diaria para la estación Siquirichic en Chihuahua bajo el escenario A2 regionalizado. Negro PDF observada y rojo PDF proyectada para 2080.

Ejemplo 2.- Cambios en los días de eventos extremos de precipitación.

En este ejemplo se muestra como calcular el número de días por año con precipitación extrema que bajo cambio climático incrementarían o disminuirían. Se define precipitación extrema a los eventos de precipitación con menor o igual probabilidad a 5% de ocurrencia en la cola superior, es decir, a partir del percentil 95.

Paso 1.- Se selecciono una región de interés, en este caso la región cercana al humedal costero de Altamira, región fronteriza entre los estados de Veracruz y

Tamaulipas (Fig. A5). Se tomaron todas las estaciones con más de 20 años de datos continuos en esta región que pasaran el proceso de validación mostrado en la página 6. Un total de 19 estaciones.

NOTA: Este ejercicio puede hacerse solo para un punto. Hacerlo para una región requiere considerar varios puntos (estaciones).

Paso 2.- Se hizo el paso 1 del ejercicio 1 para cada una de las estaciones pero con los datos de precipitación. No se ajusto ninguna distribución, se evaluó el percentil 95 de los datos históricos con un histograma.

Paso 3.- Se hizo el procedimiento anterior para los datos generados por *Lars* para el escenario A2 en el periodo 2070-2099.

Paso 4.- Se ubico el percentil 95 histórico (del paso 2) en el histograma de datos proyectados por *Lars* (del paso 3) y se calculo la probabilidad de este umbral.

Paso 5.- Se multiplico la probabilidad calculada en el paso 4 por 365 para traducir la probabilidad en número de días de eventos extremos anuales bajo cambio climático, luego se le resto el número de días históricos de condición (aproximadamente 18) para obtener solo la anomalía en el número de estos días.

Paso 6.- Se mapeo dicha información con GMT.

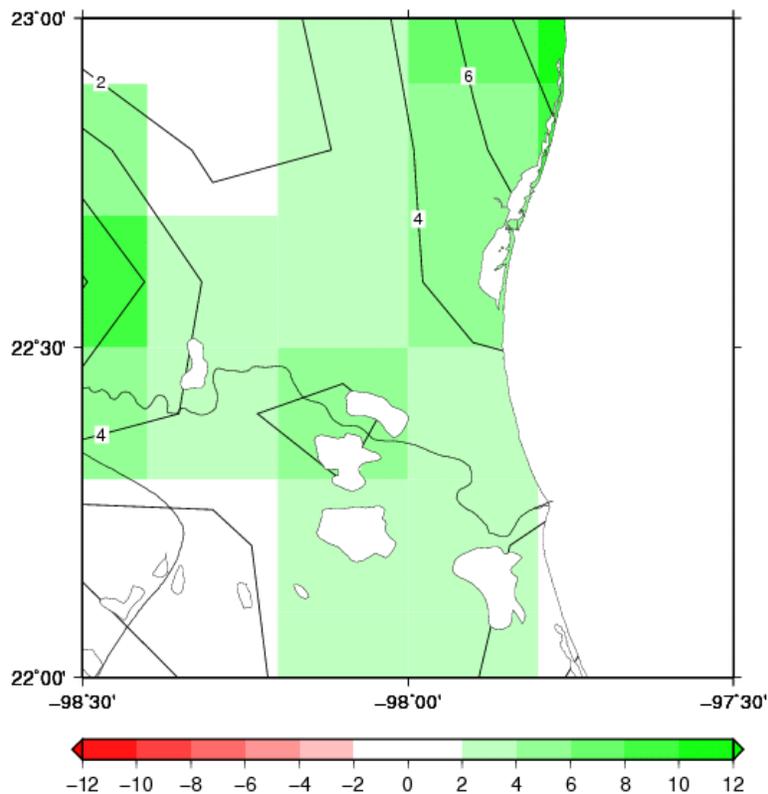


Figura A5.- Incremento en número de días de eventos extremos de precipitación (precipitación superior al percentil 95 histórico) bajo el escenario A2 2070-2099.

Mapeando con GMT

GMT Requiere un formato de datos texto ordenados por longitud, latitud y valor. Los datos obtenidos son los siguientes:

261.6200	22.2100	2
261.9400	22.9300	3
261.8400	22.6100	5
261.8700	22.6000	3
261.7000	22.7100	2
261.9700	22.4100	5
261.6500	22.9100	3
261.5700	22.8300	5
261.8200	22.4600	3
262.1400	22.2100	3
261.9400	22.9100	4
262.0300	22.3600	2
261.5700	22.6600	10
262.0900	22.6500	5
261.5900	22.4100	6
261.8400	22.0500	5
262.0000	22.2100	1
262.1500	22.1800	4
261.5400	22.0100	1

El *script* para graficar estos datos con GMT es el siguiente:

```
surface datos.xyz -Gdatos.grd -I0.2/0.2 -R261.5/262.5/22/23
psbasemap -R -Jx16d -Ba0.5WeSn -V -K -X7 -Y4 > datos.ps
makecpt -Cred2green -T-10/10/2 > pDY.cpt
grdview datos.grd -R -J -B -CpDY.cpt -Ts -V -K -O >> datos.ps
grdcontour B-PCP-50-prbP05SA.grd -R -J -A2f12a0 -V -K -O >> datos.ps
```

pscoast -S255/255/255 -R -J -B -W1 -Na/2/0/0/0 -Df -O -K -V >> datos.ps

psscale -D8/-1.5/16/.5h -B2 -CpDY.cpt -E -O -V >> datos.ps

Referencias

Zermeño, D. D. M. (2008). Análisis probabilístico de escenarios escalados de precipitación y temperatura bajo cambio climático en México. Tesis de Maestría en Ciencias. UNAM 83pp.

Bibliografía Recomendada:

Katz, R.W. (1996): Use of conditional stochastic models to generate climate change scenarios. *Climatic Change* 32, 237-255. Racsko P., Szeidl L. & Semenov M. (1991): A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling* 57, 27-41.

Richardson C.W. (1981). Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar Radiation. *Water Resources Research*, 17,182-190.

Richardson, C.W. & Wright, D.A. (1984): WGEN: A model for generating daily weather variables. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8, USDA, Washington, DC.

Semenov M.A. & Barrow E.M. (1997): Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change* 35, 397-414.

Semenov M.A., Brooks R.J., Barrow E.M. & Richardson C.W (1998): Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. *Climate Research* 10, 95-107.

Semenov M.A. & Brooks R.J. (1999): Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain. *Climate Research* 11, 137-148.

Anexo 2 Glosario de términos

Adaptación

Ajuste de los *sistemas humanos* o naturales frente a entornos nuevos o cambiantes. La adaptación al *cambio climático* se refiere a los ajustes en sistemas humanos o naturales como respuesta a *estímulos* climáticos proyectados o reales, o sus efectos, que pueden moderar el daño o aprovechar sus aspectos beneficiosos. Se pueden distinguir varios tipos de adaptación, entre ellas la preventiva y la reactiva, la pública y privada, o la autónoma y la planificada.

Actividad solar

El Sol presenta períodos de gran actividad que se observan en una serie de manchas solares, además de producción radiactiva, actividad magnética, y emisión de partículas de gran energía. Estas variaciones tienen lugar en una serie de escalas temporales que van desde millones de años a minutos. Véase también *Ciclo solar*.

Aerosoles

Grupo de partículas sólidas o líquidas transportadas por el aire, con un tamaño de 0,01 a 10 μm , que pueden sobrevivir en la *atmósfera* al menos durante unas horas. Los aerosoles pueden tener un origen natural o *antropogénico*. Los aerosoles pueden tener influencia en el *clima* de dos formas diferentes: directamente, por dispersión y absorción de la radiación, e indirectamente, al actuar como núcleos de condensación en la formación de nubes o modificar las propiedades ópticas y tiempo de vida de las nubes. Véase *Efectos indirectos de aerosoles*.

Albedo

Fracción de radiación solar reflejada por una superficie u objeto. A menudo se expresa como porcentaje. Las superficies cubiertas por nieve tienen un alto nivel de albedo; el albedo de los suelos puede ser alto o bajo; las superficies cubiertas de vegetación y los océanos tienen un bajo nivel de albedo. El albedo de la Tierra varía principalmente debido a los niveles diferentes de nubes, nieve, hielo, vegetación y cambios en la superficie terrestre.

Antropogénico

Resultante o producido por acciones humanas.

Atmósfera

Cubierta gaseosa que rodea la Tierra. La atmósfera seca está formada casi en su integridad por nitrógeno (78,1 por ciento de la proporción de mezcla de volumen) y por oxígeno (20,9 por ciento de la proporción de mezcla de volumen), junto con una serie de pequeñas cantidades de otros gases como argón (0,93 por ciento de la mezcla de volumen), el helio, y *gases radiativos de efecto invernadero* como el *dióxido de carbono* (0,035 por ciento de la mezcla de volumen) y el ozono. Además, la atmósfera contiene vapor de agua, con una cantidad variable pero que es normalmente de un 1 por ciento del volumen de mezcla. La atmósfera también contiene nubes y *aerosoles*.

Atribución

Véase Detección y atribución.

Biosfera (terrestre y marina)

Parte del sistema terrestre que comprende todos los ecosistemas y organismos vivos en

la atmósfera, en la tierra (biosfera terrestre), o en los océanos (biosfera marina), incluida materia orgánica muerta derivada (por ejemplo, basura, materia orgánica en suelos y desechos oceánicos).

Cambio climático

Importante variación estadística en el estado medio del clima o en su *variabilidad*, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes *antropogénicos* en la composición de la *atmósfera* o en el *uso de las tierras*. Se debe tener en cuenta que la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (CMCC), en su Artículo 1, define ‘cambio climático’ como: ‘un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables’. La CMCC distingue entre ‘cambio climático’ atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y ‘variabilidad climática’ atribuida a causas naturales. Véase también *Variabilidad climática*.

Cambio en el uso de las tierras

Un cambio en el uso o gestión de las tierras por los humanos, que puede llevar a un cambio en la cubierta de dichas tierras. La cubierta de las tierras y el cambio en el uso de las tierras pueden tener un impacto en el albedo, la evapotranspiración, y las fuentes y los *sumideros* de *gases de efecto invernadero*, u otras propiedades del *sistema climático*, y puede tener igualmente consecuencias en el clima, ya sea de manera local o mundial. Véase también el Informe Especial del IPCC: Informe Especial del IPCC: Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (IPCC, 2000b).

Capacidad de adaptación

Capacidad de un sistema para ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad climática y los cambios extremos) a fin de moderar los daños potenciales, aprovechar las consecuencias positivas, o soportar las consecuencias negativas.

Capacidad de mitigación

Estructuras y condiciones sociales, políticas y económicas que se requieren para una *mitigación* eficaz.

Ciclo del carbono

Término utilizado para describir el flujo de carbono (en varias formas, por ejemplo el dióxido de carbono) a través de la *atmósfera*, océanos, *biosfera* terrestre, y *litosfera*.

Circulación general

Movimientos a gran escala de la *atmósfera* y los océanos como consecuencia del calor diferencial en la Tierra en rotación, con el objetivo de restablecer el equilibrio energético del sistema mediante el transporte de calor y el impulso.

Clima

En sentido estricto, se suele definir el clima como ‘estado medio del tiempo’ o, más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo en términos de valores medios y variabilidad de las cantidades pertinentes durante períodos que pueden ser de meses a miles o millones de años. El período normal es de 30 años, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Las cantidades aludidas son casi

siempre variables de la superficie (por ejemplo, temperatura, precipitación o viento), aunque en un sentido más amplio el 'clima' es una descripción (incluso una descripción estadística) del estado del sistema climático.

CO2 (dióxido de carbono) equivalente

Concentración de *dióxido de carbono* que podría causar el mismo grado de forzamiento radiativo que una mezcla determinada de dióxido de carbono y otros *gases de efecto invernadero*.

Combustibles fósiles

Combustibles basados en carbono de *depósitos* de carbono fósil, incluidos el petróleo, el gas natural y el carbón.

Criosfera

Componente del *sistema climático* que consiste en el conjunto de nieve, hielo, *permafrost*, por encima y por debajo de la superficie terrestre y oceánica. Véase también *Glaciar* y *Placa de hielo*.

Cuenca

La zona de drenaje de una corriente, río o lago.

Deforestación

Conversión de *bosques* en zonas no boscosas. Para obtener más información sobre el término bosques y temas relacionados, como forestación, reforestación, y deforestación, véase el Informe Especial del IPCC: Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (IPCC, 2000b).

Desarrollo sostenible o sustentable

Desarrollo que atiende las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

Detección y atribución

El clima varía continuamente en todas las *escalas temporales*. La detección del cambio climático es el proceso que muestra que el clima ha cambiado en algún sentido definido estadísticamente, sin tener que aportar una razón para explicar dicho cambio. La atribución de causas del cambio climático es el proceso de establecer las causas más probables para los cambios detectados con un nivel de confianza definido.

Dióxido de carbono (CO2)

Gas que se produce de forma natural, y también como subproducto de la combustión de combustibles fósiles y *biomasa*, cambios en el uso de las tierras y otros procesos industriales. Es el principal *gas de efecto invernadero antropogénico* que afecta al equilibrio de radiación del planeta. Es el gas de referencia frente al que se miden otros gases de efecto invernadero y, por lo tanto, tiene un *Potencial de calentamiento mundial* de 1.

Ecosistema

Sistema de organismos vivos que interactúan y su entorno físico. Los límites de lo que se puede denominar ecosistema son un poco arbitrarios, y dependen del enfoque del interés o estudio. Por lo tanto, un ecosistema puede variar desde unas escalas espaciales muy pequeñas hasta, en último término, todo el planeta.

Efecto invernadero

Los *gases de efecto invernadero* absorben la *radiación infrarroja*, emitida por la superficie de la Tierra, por la propia *atmósfera* debido a los mismos gases, y por las nubes. La radiación atmosférica se emite en todos los sentidos, incluso hacia la superficie terrestre. Los gases de efecto invernadero atrapan el calor dentro del sistema de la *troposfera* terrestre. A esto se le denomina 'efecto invernadero natural.' La radiación atmosférica se vincula en gran medida a la temperatura del nivel al que se emite. En la troposfera, la temperatura disminuye generalmente con la altura. En efecto, la radiación infrarroja emitida al espacio se origina en altitud con una temperatura que tiene una media de -19°C, en equilibrio con la *radiación solar* neta de entrada, mientras que la superficie terrestre tiene una temperatura media mucho mayor, de unos +14°C. Un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero produce un aumento de la opacidad infrarroja de la atmósfera, y por lo tanto, una radiación efectiva en el espacio desde una altitud mayor a una temperatura más baja. Esto causa un *forzamiento radiativo*, un desequilibrio que sólo puede ser compensado con un aumento de la temperatura del sistema superficie– troposfera. A esto se denomina 'efecto invernadero aumentado'.

Elevación del nivel del mar

Ascenso del nivel medio del océano. La elevación eustática del nivel del mar es un cambio en el nivel medio del mar producido por la alteración en el volumen mundial de los océanos. La elevación relativa del nivel del mar ocurre cuando existe una elevación neta del nivel del océano relacionado con movimientos locales de tierras. Las *simulaciones climáticas* se concentran sobre todo en la estimación eustática del cambio del nivel del mar. Los investigadores de impactos se centran en el cambio relativo del nivel del mar.

Emisiones

En el contexto de *cambio climático*, se entiende por emisiones la liberación de *gases de efecto invernadero* y/o sus *precursores* y *aerosoles* en la *atmósfera*, en una zona y un período de tiempo específicos.

Emisiones antropogénicas

Emisiones de *gases de efecto invernadero*, de *precursores* de gases de efecto invernadero, y *aerosoles* asociados con actividades humanas. Entre estas actividades se incluyen la combustión de combustibles fósiles para producción de energía, la *deforestación* y los *cambios en el uso de las tierras* que tienen como resultado un incremento neto de emisiones.

Emisiones de CO₂ (dióxido de carbono) fósil

Emisiones de *dióxido de carbono* que resultan del consumo de combustibles de depósitos de carbono fósil como el petróleo, gas natural y carbón.

Escenario (genérico)

Descripción plausible y a menudo simplificada de la evolución el futuro, basada en un conjunto coherente e internamente consistente de hipótesis sobre fuerzas impulsoras fundamentales (por ejemplo, ritmo del avance de la tecnología y precios) y las relaciones entre dichos factores. Los escenarios no son predicciones ni pronósticos y, a veces, pueden estar basados en un '*guión narrativo*'. Los escenarios pueden derivar de proyecciones, pero a menudo están basados en información adicional de otras fuentes. Véase también *Escenarios del IEEE*, *Escenario climático*, y *Escenario de emisiones*.

Escenario climático

Representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basada en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construye para ser utilizada de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del *cambio climático antropogénico*, y que sirve a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos. Las *proyecciones climáticas* sirven a menudo como materia prima para la construcción de escenarios climáticos, pero los escenarios climáticos requieren información adicional, por ejemplo, acerca del clima observado en un momento determinado. Un 'escenario de cambio climático' es la diferencia entre un escenario climático y el clima actual.

Escenario de emisiones

Representación plausible de la evolución futura de las emisiones de sustancias que son, en potencia, radiativamente activas (por ejemplo, *gases de efecto invernadero* o *aerosoles*), basada en un conjunto de hipótesis coherentes e internamente consistentes sobre las fuerzas impulsoras de este fenómeno (tales como el desarrollo demográfico y socioeconómico, el cambio tecnológico) y sus relaciones clave. Los escenarios de concentraciones, derivados a partir de los escenarios de emisiones, se utilizan como insumos en una *simulación climática* para calcular proyecciones climáticas. En IPCC (1992), se utilizaron un conjunto de escenarios de emisiones como base para las *proyecciones climáticas* en IPCC (1996). Estos escenarios de emisiones se refieren a los escenarios IS92. En el Informe Especial del IPCC: Escenarios de Emisiones (Nakicenovic et al., 2000), se publicaron nuevos escenarios de emisiones, los llamados Escenarios del IEEE. Para comprender algunos de los términos relacionados con estos escenarios, véase *Escenarios del IEEE*.

Escenario de forzamiento radiativo

Representación plausible del desarrollo futuro del *forzamiento radiativo* asociado, por ejemplo, con cambios en la composición atmosférica o en el *uso de las tierras*, o en factores externos como las variaciones en la actividad solar. Los escenarios de forzamiento radiativo se pueden utilizar como insumos en *simulaciones climáticas* simplificadas para el cálculo de *proyecciones climáticas*.

Escenario de referencia

Véase *Dato básico*.

Escenarios de estabilización

Véase *Análisis de estabilización*.

Escenarios del IEEE

Los Escenarios del IEEE son *escenarios de emisiones* desarrollados por Nakicenovic et al. (2000) y utilizados, entre otros, como base para la realización de *proyecciones climáticas* en la contribución del GTI del IPCC al Tercer Informe de Evaluación (IPCC, 2001a). Los siguientes términos son de gran importancia para comprender adecuadamente la estructura y el uso del conjunto de Escenarios del IEEE:

- **Conjunto (de escenarios):** Escenarios que tienen un *guión* semejante desde el punto de vista demográfico, económico, social y en cuanto a cambio técnico. Los escenarios del IEEE comprenden cuatro conjuntos de escenarios: A1, A2, B1, y B2.
- **Grupo(deescenarios):** Escenariosdentrodeunconjunto que reflejan una variación constante del guión. El conjunto de los escenarios A1 incluye cuatro grupos designados A1T, A1C, A1G, y A1B que exploran estructuras alternativas de sistemas energéticos

futuros. En el Resumen para Responsables de Políticas de Nakicenovic et al. (2000), los grupos A1C y A1G se han combinado en un grupo de escenarios A1FI 'que utiliza combustibles fósiles en gran medida'. Los otros tres conjuntos de escenarios tienen un grupo cada uno. La serie de escenarios del IEEE que se refleja en el Resumen para Responsables de Políticas de Nakicenovic et al. (2000) consiste en seis grupos de escenarios diferentes, todos ellos igualmente apropiados y que recogen de forma conjunta la gama de *incertidumbres* asociadas con los forzamientos impulsores y las emisiones.

- **Escenarios ilustrativos:** Escenarios que son ilustrativos para cada uno de los seis grupos de escenarios reflejados en el Resumen para Responsables de Políticas de Nakicenovic et al. (2000). Incluyen cuatro marcadores de escenarios revisados para los grupos de escenarios A1B, A2, B1, B2, y dos escenarios adicionales para los grupos A1FI y A1T. Todos los grupos de escenarios son igualmente apropiados.

- **Marcador (de escenario):** Escenario que se colocó originalmente, en forma de proyecto, en el sitio web del IEEE para representar un determinado conjunto de escenarios. La elección de los marcadores estaba basada en las cuantificaciones iniciales que mejor reflejaban la historia y las características de las simulaciones específicas. Los marcadores no tienen un mayor grado de probabilidad que los demás escenarios, pero el equipo de redacción del IEEE los considera ilustrativos de un guión determinado. Se incluyen en una forma revisada en Nakicenovic et al. (2000). Estos escenarios han sido objeto de un examen pormenorizado por parte de todo el equipo de redacción, además de un amplio proceso abierto por parte del IEEE. Los escenarios también se utilizan para ilustrar los otros dos grupos de escenarios. **Guión (de escenario):** Descripción narrativa de un escenario (o conjunto de escenarios) que subraya las principales características del escenario, las relaciones entre las principales fuerzas impulsoras y la dinámica de su evolución.

Estratosfera

Parte muy estratificada de la *atmósfera* por encima de la *troposfera*, que se extiende de unos 10 km (de 9 km en latitudes altas a 16 km en los trópicos) a cerca de 50 km.

Evaluación de la adaptación

Práctica para la identificación de opciones que permitan la *adaptación al cambio climático* y la evaluación de dichas opciones en términos de criterios como disponibilidad, ventajas, costos, eficiencia y viabilidad.

Evaporación

Proceso por el que un líquido se convierte en gas.

Fenómenos meteorológicos extremos

Fenómeno raro dentro de su distribución estadística de referencia en un lugar determinado. Las definiciones sobre lo que se considera 'raro' pueden variar, pero un fenómeno meteorológico extremo puede ser normalmente tan raro o más raro que el percentil 10o o 90o. Por definición, las características de una meteorología extrema varían según los lugares. Un fenómeno climático extremo es una media de una serie de fenómenos meteorológicos en un período concreto, media que de por sí es extrema (por ejemplo la precipitación durante una estación).

Forzamiento externo

Véase *Sistema climático*.

Forzamiento radiativo

Cambio en la irradiación neta vertical (expresada en Wm^{-2}) en la *tropopausa* debido a un cambio interno o un cambio en el forzamiento externo del sistema climático (por ejemplo, un cambio en la concentración de *dióxido de carbono* o la potencia del Sol. Normalmente el forzamiento radiativo se calcula después de permitir que las temperaturas estratosféricas se reajusten al equilibrio radiativo, pero manteniendo fijas todas las propiedades troposféricas en sus valores sin perturbaciones.

Gas de efecto invernadero

Gases integrantes de la *atmósfera*, de origen natural y *antropogénico*, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de ondas del espectro de *radiación infrarroja* emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera, y las nubes. Esta propiedad causa el efecto invernadero. El vapor de agua (H_2O), *dióxido de carbono* (CO_2), *óxido nitroso* (N_2O), *metano* (CH_4), y *ozono* (O_3) son los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre. Además existe en la atmósfera una serie de gases de efecto invernadero totalmente producidos por el hombre, como los *halocarbonos* y otras sustancias que contienen cloro y bromuro, de las que se ocupa el *Protocolo de Montreal*. Además del CO_2 , N_2O , y CH_4 , el *Protocolo de Kyoto* aborda otros gases de efecto invernadero, como el *hexafluoruro de azufre* (SF_6), los *hidrofluorocarbonos* (HFC), y los *perfluorocarbonos* (PFC).

Humedad del suelo

Cantidad de agua almacenada dentro o en la superficie de las tierras que se encuentra disponible para la *evaporación*.

Impactos (climáticos)

Consecuencias del *cambio climático* en *sistemas humanos* y naturales. Según la medida de la *adaptación*, se pueden distinguir impactos potenciales e impactos residuales.

- Impactos potenciales: Todos los impactos que pueden suceder dado un cambio proyectado en el clima, sin tener en cuenta las medidas de *adaptación*.
- Impactos residuales: Los impactos del cambio climático que pueden ocurrir después de la adaptación.

Véase también *Impactos agregados*, *Impactos en el mercado*, e *Impactos externos*.

Incertidumbre

Expresión del nivel de desconocimiento de un valor (como el estado futuro del *sistema climático*). La incertidumbre puede ser resultado de una falta de información o de desacuerdos sobre lo que se conoce o puede conocer. Puede tener muchos orígenes, desde errores cuantificables en los datos a conceptos o terminologías definidos ambiguamente, o proyecciones inciertas de conductas humanas. La incertidumbre se puede representar con valores cuantitativos (como una gama de valores calculados por varias simulaciones) o de forma cualitativa (como el juicio expresado por un equipo de expertos). Véase Moss y Schneider (2000).

Isla de calor

Zona dentro de un área urbana caracterizada por una temperatura ambiente más alta que las zonas colindantes debido a una absorción de la energía solar por materiales como el asfalto.

Litosfera

Capa superior de la Tierra sólida, tanto oceánica como continental, compuesta de rocas

de la corteza terrestre y la parte fría—elástica principalmente—de la capa superior del manto. La actividad volcánica, aunque es parte de la *litosfera*, no se considera parte del *sistema climático*, pero actúa como un componente del forzamiento externo.

Mala adaptación

Cualquier cambio en *sistemas humanos* o naturales que aumentan de forma inadvertida la vulnerabilidad a *estímulos climáticos*; adaptación que no consigue reducir la vulnerabilidad, sino que la aumenta.

Mitigación

Intervención *antropogénica* para reducir las fuentes o mejorar los *sumideros* de *gases de efecto invernadero*.

Nivel medio del mar (MSL)

Nivel medio relativo del mar en un período determinado (como un año o un mes) que sea lo suficientemente largo como para compensar fenómenos transitorios como las olas. Véase también *Elevación del nivel del mar*.

No linealidad

Un proceso se denomina ‘no lineal’ cuando no existe una relación simple proporcional entre causa y efecto. El *sistema climático* contiene muchos procesos no lineales, lo que le convierte en un sistema con un comportamiento muy complejo. Dicha complejidad puede llevar a un rápido *cambio climático*.

Ozono (O3)

Forma triatómica del oxígeno (O₃), es un componente gaseoso de la *atmósfera*. En la *troposfera* se crea de forma natural y por reacciones fotoquímicas por medio de gases que resultan de actividades humanas (el ‘esmog’ fotoquímico). En grandes concentraciones, el ozono troposférico puede ser perjudicial para una amplia gama de organismos vivos. El ozono troposférico actúa como un *gas de efecto invernadero*. En la estratosfera, el ozono se crea por la interacción entre la *radiación solar ultravioleta* y el oxígeno molecular (O₂). El ozono estratosférico tiene un papel decisivo en el equilibrio de radiación estratosférica. Su concentración es más elevada en la *capa de ozono*. El agotamiento de la capa de ozono estratosférica, debido a reacciones químicas que se pueden ver aumentadas por el *cambio climático*, puede producir un aumento del flujo a nivel del suelo de radiación ultravioleta— B. Véase también *Protocolo de Montreal* y *Capa de ozono*.

Políticas y medidas

En la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, se entiende por ‘políticas’ aquellas acciones que pueden ejecutar u ordenar un gobierno—a menudo junto con empresas e industrias dentro de sus propios países, además de en otros países—para acelerar la aplicación y el uso de medidas encaminadas a frenar las emisiones de *gases de efecto invernadero*. Las ‘medidas’ son tecnologías, procesos y prácticas utilizadas para aplicar políticas que, si se emplean, pueden reducir las emisiones de gases de efecto invernadero por debajo de niveles futuros anticipados. Entre los ejemplos pueden mencionarse los *impuestos sobre carbono* o sobre otras energías, normas para mejorar la eficiencia de combustibles en automóviles, etc. Se entiende por políticas ‘comunes o coordinadas’ o ‘armonizadas’ las adoptadas de forma conjunta por las Partes.

Predicción climática

Resultado de un intento de producir la descripción o la mejor estimación de la evolución real del clima en el futuro (a *escalas temporales* estacionales, interanuales o a largo plazo). Véase también *Proyección climática* y *Escenario (de cambio) climático*.

Proyección (genérica)

Evolución potencial futura de una cantidad o conjunto de cantidades, a menudo calculadas con la ayuda de una simulación. La proyección se diferencia de una 'predicción' para enfatizar que la proyección se basa en hipótesis sobre, por ejemplo, avances tecnológicos y socioeconómicos futuros, que se pueden o no realizar, y está sujeta a una gran *incertidumbre*. Véase también *Proyección climática* y *Predicción climática*.

Proyección climática

Proyección de la *respuesta del sistema climático a escenarios de emisiones o concentraciones de gases de efecto invernadero y aerosoles, o escenarios de forzamiento radiativo*, basándose a menudo en *simulaciones climáticas*. Las proyecciones climáticas se diferencian de las *predicciones climáticas* para enfatizar que las primeras dependen del escenario de forzamientos radiativo/emisiones/concentraciones/radiaciones utilizado, que se basa en hipótesis sobre, por ejemplo, diferentes pautas de desarrollo socioeconómico y tecnológico que se pueden realizar o no y, por lo tanto, están sujetas a una gran *incertidumbre*.

Sensibilidad del clima

En los informes del IPCC, la 'sensibilidad de equilibrio del clima' suele hacer referencia al cambio (en condiciones de equilibrio) de la temperatura media de la superficie mundial a raíz de una duplicación de la concentración atmosférica de CO₂ (o de CO₂ equivalente). En términos más generales, hace referencia al cambio, en condiciones de equilibrio, de la temperatura del aire cuando el *forzamiento radiativo* varía en una unidad (°C/Wm⁻²). En la práctica, la evaluación de la sensibilidad del clima en condiciones de equilibrio requiere unas simulaciones muy extensas junto a simulaciones generales de circulación. La 'sensibilidad climática efectiva' es una medida relacionada con esto que sortea este requisito. Se evalúa a partir de una simulación para condiciones en evolución que no están en equilibrio. Es una medida de la fuerza de las respuestas en un momento determinado que pueden variar con el historial de los forzamientos y el estado climático. Véase *Simulación climática*.

Sensibilidad

Nivel en el que un sistema resulta afectado, ya sea negativa o positivamente, por *estímulos* relacionados con el clima. El efecto puede ser directo (por ejemplo, un cambio en la producción de las cosechas en respuesta a la media, gama o variabilidad de las temperaturas) o indirecto (los daños causados por un aumento en la frecuencia de inundaciones costeras debido a una elevación del nivel del mar). Véase también *Sensibilidad climática*.

Sequía

Fenómeno que se produce cuando la precipitación ha estado muy por debajo de los niveles normalmente registrados, causando unos serios desequilibrios hidrológicos que afectan de manera adversa a los sistemas terrestres de producción de *recursos*.

Sistema climático

Sistema muy complejo que consiste en cinco componentes principales: la *atmósfera*, la *hidrosfera*, la *criosfera*, la superficie terrestre y la *biosfera*, y las interacciones entre ellas. El *sistema climático* evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna debido a forzamientos externos (por ejemplo, erupciones volcánicas, variaciones solares, y forzamientos inducidos por el hombre tales como la composición cambiante de la atmósfera y el *cambio en el uso de las tierras*).

Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta o tiempo de ajuste es el tiempo necesario para que el *sistema climático* o sus componentes se reequilibren en un nuevo estado, tras unos forzamientos que resultan de procesos o respuestas internos y externos. Es muy diferente para los diversos componentes del sistema climático. El tiempo de respuesta de la *troposfera* es relativamente corto, de días a semanas, mientras que el de la *estratosfera* se equilibra en una escala temporal comprendida normalmente en unos pocos meses. Debido a su gran capacidad térmica, los océanos tienen un tiempo de respuesta mucho mayor, normalmente decenios, pero que pueden ser incluso siglos o milenios. Por lo tanto, el tiempo de respuesta del sistema conjunto superficie–troposfera es lento, si se compara con el de la estratosfera, y se encuentra determinado principalmente por los océanos. La *biosfera* puede responder rápidamente (por ejemplo, frente a sequías), pero su respuesta es también muy lenta para cambios impuestos. Véase *Tiempo de vida* para una definición diferente de tiempo de respuesta relacionado con la velocidad de los procesos que afectan a la concentración de gases traza.

Uso de las tierras

Acuerdos, actividades e insumos aplicados en un tipo determinado de cubierta terrestre (un conjunto de acciones humanas). Objetivos sociales y económicos para los que se gestionan las tierras (por ejemplo el pastoreo, la extracción de madera y la conservación).

Variabilidad del clima

La variabilidad del clima se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, etc.) del clima en todas las *escalas temporales y espaciales*, más allá de fenómenos meteorológicos determinados. La variabilidad se puede deber a procesos internos naturales dentro del *sistema climático* (variabilidad interna), o a variaciones en los forzamientos externos *antropogénicos* (variabilidad externa). Véase también *Cambio climático*.