

MODELACIÓN INTEGRADA DE CAMBIO CLIMÁTICO: ESCENARIOS, COSTOS Y OPORTUNIDADES

INFORME FINAL

RESPONSABLE: FRANCISCO ESTRADA PORRÚA.

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM

PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN EN CAMBIO CLIMÁTICO, UNAM

Contenido

Introducción.....	3
Módulo para proyecciones de temperatura y precipitación.....	4
Medidas de riesgo basadas en proyecciones de temperatura y precipitación.....	11
Funciones de impacto utilizadas en el MEICCA.....	16
Procedimiento para la generación de escenarios de producto interno bruto.....	17
Estimación de los impactos de cambio climático para México.....	18
Conclusiones.....	21
Referencias.....	s22

Introducción

Durante este proyecto se avanzó en la actualización y extensión del modelo de evaluación integrada MEICCA desarrollado por el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), UNAM. El objeto de dicho modelo consiste en generar información sobre los impactos potenciales de cambio climático en la economía que puedan ser de utilidad para apoyar la toma de decisiones. El MEICCA se basa en el enfoque de Evaluación Integrada que provee un marco simple y flexible que permite evaluar una variedad de posibles escenarios, estrategias de respuesta y diferencias en parámetros y que, al mismo tiempo, es capaz de representar las características esenciales de los procesos que se están modelando. (Jakeman et al., 2006; Giupponi et al., 2013). Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en cambio climático, particularmente en estudios encargados por dependencias de gobierno para evaluar los costos de impactos de cambio climático y de acciones para reducirlos (<http://www3.epa.gov/climatechange/EPAactivities/economics/scc.html>).

El Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM inició en 2011 la construcción de un modelo de evaluación integrada estocástico capaz de atender las limitaciones antes mencionadas en cuanto a escenarios físicos de clima y que fuera capaz de evaluar los costos de cambio climático y de las acciones que se planteen para enfrentarlo. Con recursos del Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México se creó una versión del modelo para evaluar los impactos de cambio climático en la ciudad y sus distintas delegaciones (Estrada y Martínez, 2011). Los resultados mostraron que cambio climático podría representar un importante riesgo para la ciudad y comprometer sus metas en cuanto a crecimiento económico y reducción de pobreza.

Investigación reciente realizada para desarrollar el MEICCA se ha enfocado en mejorar la especificación de las funciones de daño comúnmente usadas para aproximar los costos económicos de cambio climático (Estrada et al., 2015; Estrada y Tol, 2015; Estrada et al., 2017). El presente proyecto utiliza el tipo de función de daño descrita en Estrada et al. (2015) que permite incorporar la dinámica y persistencia de los impactos de cambio climático sobre la economía. El módulo de clima del MEICCA fue actualizado para este proyecto. Las proyecciones de cambio en la temperatura global se obtienen del modelo MAGICC en sus versiones 5.3 y 6 (Hulme et al., 2000) y el MEICCA ahora emula las proyecciones regionales del CMIP3 de temperatura y precipitación utilizando los 20 patrones de escala incluidos en el SCENGEN (MAGICC 5.3). El MEICCA produce escenarios probabilísticos de cambio climático mediante métodos de simulación estadística en los cuales se combinan los patrones antes mencionados.

Un avance importante consiste en la utilización de escenarios socioeconómicos con una resolución espacial de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. Dichos escenarios están basados en las proyecciones

socioeconómicas llamadas *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), que fueron diseñadas para acompañar los escenarios de forzamiento radiativos incluidos en los *Representative Concentration Pathways* (RCP). La proyección de dichos escenarios socioeconómicos en una malla regular de 0.5°x0.5° se basa en la utilización de los patrones de desarrollo de las familias de escenarios de emisiones del Special Report on Emissions Scenarios que son consistentes con los SSP.

En las siguientes secciones de este informe se muestran los avances en el MEIICA y algunas estimaciones de los costos de cambio climático e índices de riesgo para México.

Módulo para proyecciones de temperatura y precipitación

Se desarrollaron dos versiones para el módulo de proyecciones de clima. La primera es determinística y se basa en utilizar directamente las proyecciones de temperatura global obtenidas del modelo MAGICC (versiones 5.3 y 6). La segunda utiliza una distribución de probabilidades triangular para emular los resultados del MAGICC basados en valores bajo, medio y altos de sensibilidad del clima.

Los escenarios de emisiones que la versión utilizada del MEIICA en este informe son RCP8.5, RCP6, RCP4.5, RCP3PD, así como el A2 y los escenarios de estabilización a 350ppm, 450ppm, 550ppm, 650ppm y 750ppm. Los escenarios de cambio en temperatura global se obtuvieron de manera exógena al MEIICA mediante el MAGICC y el procedimiento para obtener cambios regionales en temperatura y precipitación se utiliza el método de patrones de escala propuesto originalmente por Santer et al. (1990).

El patrón de escala simple puede ser descrito de la siguiente manera (ver Tebaldi y Arblaster, 2014):

$$P(t, x, y, s) = T(t)p(t, x, y, s) \quad (1)$$

Donde x , y definen la longitud y latitud de los puntos de malla, s define el periodo del año (e.g., un mes en particular, una estación, valor anual), t es el tiempo, $T(t)$ indica el cambio en la temperatura anual global al tiempo t bajo un cierto escenario de emisiones, $p(t, x, y, s)$ es el patrón espacial de cambio para una variable en particular (e.g., temperatura, precipitación) que es invariante en el tiempo, y $P(t, x, y, s)$ es el campo de cambio para la variable escogida, en el tiempo t y para un modelo y escenario de emisiones específicos. En este informe se utilizan la biblioteca de patrones de escala del SCENGEN incluido en el MAGICC 5.3 (Hulme et al., 2000) y que permiten emular las proyecciones de 20 modelos de circulación general del CMIP3 (ver Tabla 1). El procedimiento para generar los escenarios regionales probabilístico se basa en métodos de simulación de Monte Carlo. Para este propósito se utiliza una distribución de probabilidad uniforme sobre los 20 modelos lo que implica que cada modelo se juzga igualmente posible y se basa en el

principio de la razón insuficiente de Laplace (1825). Adicionalmente, la distribución uniforme es también la distribución de máxima entropía cuando no se tiene información adicional sobre el proceso que está siendo modelado (ver Gay y Estrada, 2010; Jaynes, 1957, 1962).

Tabla 1. Modelos del CMIP3 incluidos en MAGICC/SCENGEN 5.3 y utilizados en este informe.

Modelo	País	Modelo	País
BCCR-BCM2.0	Noruega	GISS-EH	EUA
CCSM3	EUA	GISS-ER	EUA
CGCM3.1(T47)	Canada	INM-CM3.0	Rusia
CNRM-CM3	Francia	IPSL-CM4	Francia
CSIRO-Mk3.0	Australia	MIROC3.2(hires)	Japón
ECHAM5/MPI-OM	Alemania	MIROC3.2(medres)	Japón
ECHO-G	Alemania/Corea	MRI-CGCM2.3.2	Japón
FGOALS-g1.0	China	PCM	EUA
GFDL-CM2.0	EUA	UKMO-HadCM3	Reino Unido
GFDL-CM2.1	EUA	UKMO-HadGEM1	Reino Unido

La versión del módulo de clima que incluye la incertidumbre en la sensibilidad del clima incluye un paso adicional en el cual se utiliza una distribución triangular para escalar los escenarios regionales producidos. Para encontrar los parámetros de la distribución triangular que permiten emular los resultados del MAGICC 6 bajo sensibilidades baja y alta se utilizó la siguiente regresión:

$$T_t^{sens*} = \beta T_t^{media} + \varepsilon_t \quad (2)$$

En donde T_t^{sens*} es la temperatura global obtenida con el MAGICC para una sensibilidad $sens^*$ que puede ser baja (1.5°C) o alta (4.5°C), T_t^{media} es la temperatura global obtenida con el MAGICC para una sensibilidad media, β es un parámetro a estimarse y ε_t son los residuales de la regresión. Resulta importante notar que el propósito de esta regresión no es hacer inferencias sobre valores poblacionales (eso requeriría que se satisficieran los supuestos del modelo de regresión; ver, por ejemplo, Estrada et al., 2014). La regresión se utiliza simplemente como un procedimiento para encontrar el valor del parámetro β que minimiza la suma de los errores al cuadrado.

La Tabla 2 muestra los valores estimados de β que relacionan las proyecciones de la temperatura global valores de sensibilidad baja y alta con aquellas obtenidas con sensibilidad media. Los resultados muestran que el valor del coeficiente β para una sensibilidad dada (baja o alta) no varía de manera importante y que cada una de las regresiones provee un ajuste muy bueno (en todos los casos se obtiene una R^2 mayor a

0.99). Los mejores ajustes se obtienen para los escenarios de no estabilización (RCP8.5; RCP6), que para escenarios que sugieren un inicio de estabilización (RCP4.5) y que para escenarios de estabilización (RCP3PD).

Para los resultados que se muestran a continuación se utilizan los valores promedio de los coeficientes estimados para sensibilidad alta y baja. En el caso de la sensibilidad alta, el valor promedio de los coeficientes es 1.3413645 y en el caso de la baja es 0.5679065.

Tabla 2. Coeficientes y medida de bondad de ajuste de la regresión (2) para las proyecciones de temperatura global bajo los escenarios de emisiones RCP8.5, RCP6, RCP4.5 y RCP3PD.

Regresión	Coeficiente	Estadístico t	R2
RCP8.5 Sens*=4.5	1.336930 (0.001936)	690.4608	0.999079
RCP8.5 Sens*=1.5	0.576220 (0.001106)	521.0775	0.998347
RCP6 Sens*=4.5	1.334493 (0.002149)	620.8565	0.998832
RCP6 Sens*=1.5	0.571983 (0.001429)	400.2038	0.997122
RCP4.5 Sens*=4.5	1.343010 (0.002779)	483.2527	0.998043
RCP4.5 Sens*=1.5	0.565214 (0.001838)	307.4541	0.995043
RCP3PD Sens*=4.5	1.351025 (0.003825)	353.2546	0.996257
RCP3PD Sens*=1.5	0.558209 (0.002555)	218.4723	0.990025

La Figura 1 muestra las temperaturas globales obtenidas mediante el MAGICC 6 para sensibilidades media, baja y alta, y la aproximación que se obtiene usando los promedios de los coeficientes en la Tabla 2. Las diferencias (en valor absoluto) entre las proyecciones originales y las aproximaciones se muestran en la Figura 2. Como se observa en dicha figura, las distancias entre los valores del MAGGIC y las aproximaciones varían con el tiempo, dependen del escenario de emisiones utilizado y difieren para el caso de sensibilidad baja y alta. En ningún caso el error de aproximación rebasa los 0.17°C, el cual —dada la magnitud de la incertidumbre típica en las proyecciones de cambio climático— es en práctica poco relevante.

Dado el buen ajuste y la capacidad de reproducir las proyecciones del MAGICC, en los valores promedio de los coeficientes en la Tabla 1 serán utilizados como parámetros de la

distribución triangular que representa la incertidumbre en la sensibilidad del clima. De esta forma, los valores de los parámetros de la distribución triangular son 0.5679065 para el límite inferior, 1 para el valor central y 1.3413645 para el límite superior. Estos valores permiten emular las proyecciones que se obtendrían al correr el MAGICC con valores de sensibilidad del clima (escogidos aleatoriamente) entre 1.5°C y 4.5°C, dando una mayor probabilidad de ocurrencia a valores cercanos a la sensibilidad media de 3°C.

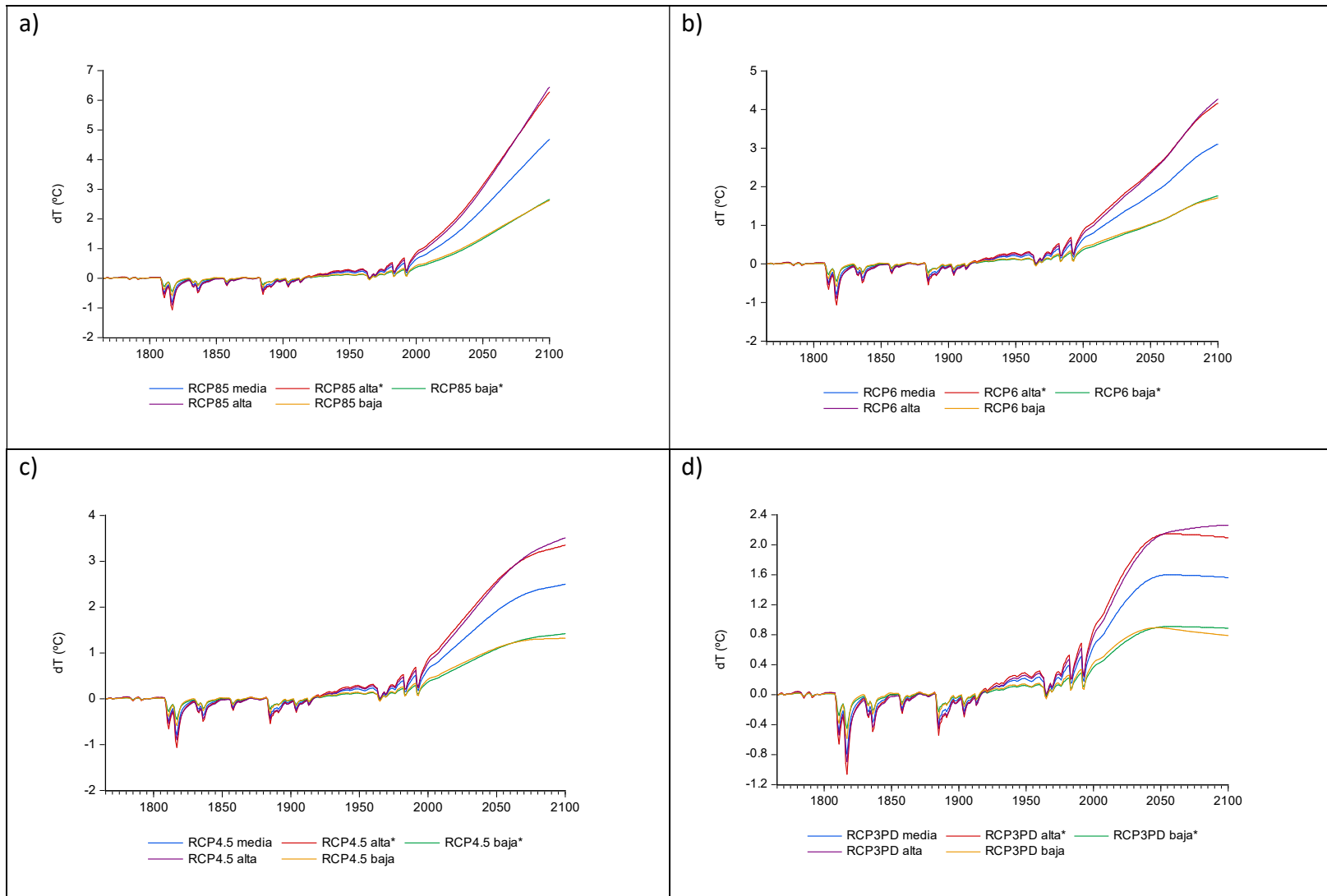


Figura 1. Escenarios de temperatura del aire media global anual para tres valores de sensibilidad del clima (baja, media, alta) y sus aproximaciones utilizado los valores promedio de la Tabla 2. Panel a) RCP8.5, panel b) RCP6, panel c) RCP4.5, panel d) RCP3PD.

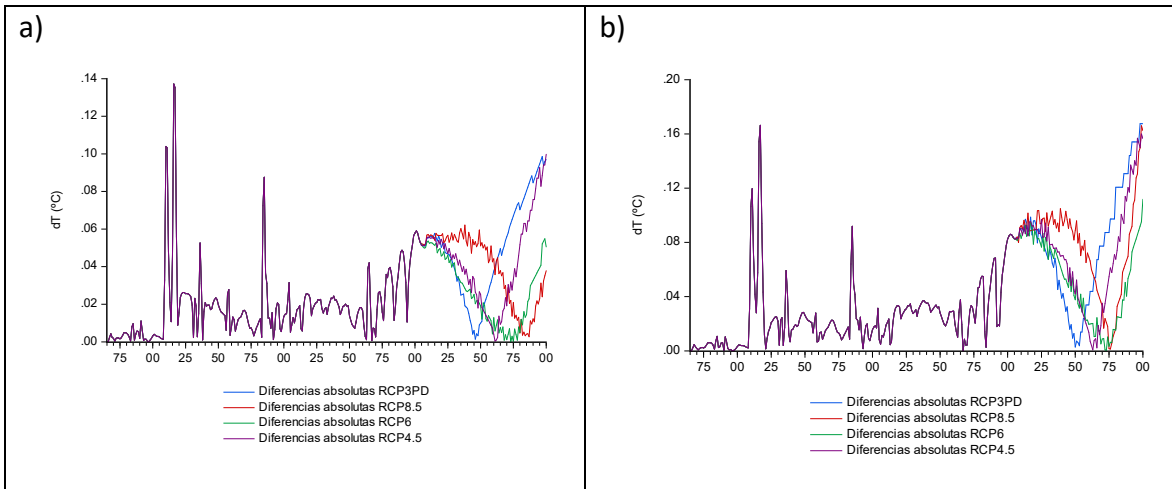


Figura 2. Diferencias (en valor absoluto) entre los escenarios producidos utilizando el MAGICC para sensibilidades baja (panel a) y alta (panel b) y las aproximaciones basadas en el promedio de los coeficientes reportados en la Tabla 2.

Este informe incluye como ejemplo de los escenarios realizados, un archivo del programa MATLAB que contiene 100 simulaciones para temperatura y precipitación bajo el escenario RCP8.5 (el tamaño del archivo es 1.51 GB). El archivo contiene dos matrices de cuatro dimensiones: latitud, longitud, tiempo y número de simulación y contiene las series de tiempo anuales (2000 a 2100) para cada punto en la malla y para cada simulación realizada. Las incluidas son temperatura y precipitación.

La Figura 3) muestra la media y la mediana de los cambios proyectados para temperatura (°C) y precipitación (%) para finales del siglo bajo el escenario de emisiones RCP8.5. En el caso de los cambios en temperatura anual, se muestra un claro gradiente norte-sur en el que los aumentos mayores (hasta 7°C) se dan en la parte norte y los menores en el sur (alrededor de 4°C). El patrón es similar en el caso de la media y la mediana, aunque los aumentos tienden a ser menores en la segunda (la distribución de los cambios es asimétrica). En el caso de los cambios en precipitación, existe un patrón espacial bien definido en el que el noroeste y el sureste muestran reducciones en la precipitación mientras que la región centro y centro norte muestran aumentos en precipitación. Al igual que en el caso de la temperatura, la distribución de los cambios es asimétrica y la mediana de las simulaciones muestra cambios de menor magnitud que la media.

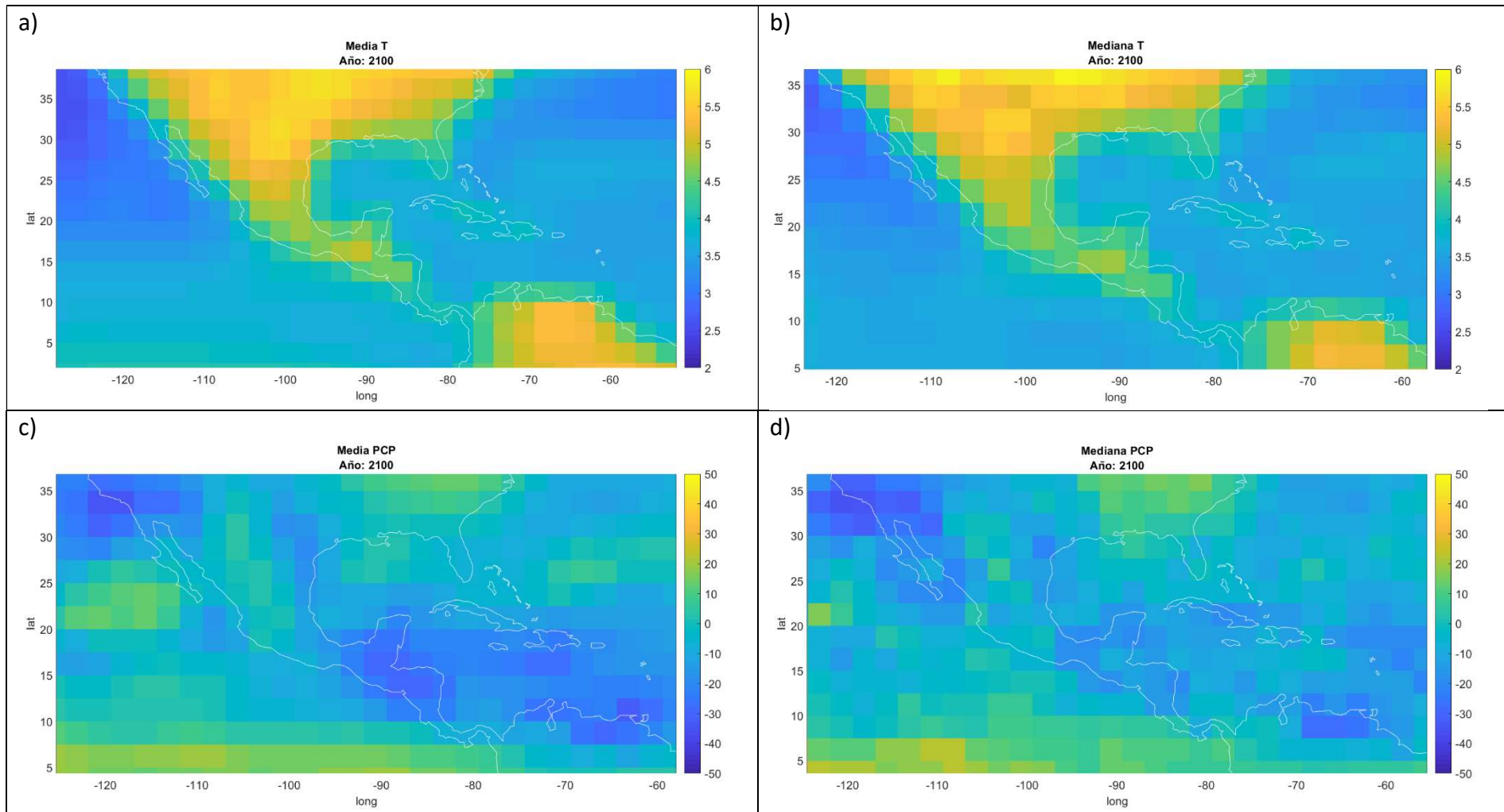


Figura 3. Cambios esperados en temperatura y precipitación para el 2100. Los paneles a) y c) muestran la media de las simulaciones para temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y precipitación (%), respectivamente. Los paneles b) y d) muestran la mediana de las simulaciones para temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y precipitación (%), respectivamente.

Medidas de riesgo basadas en proyecciones de temperatura y precipitación

Generalmente, las proyecciones de cambio climático resultan difíciles de comunicar a los tomadores de decisión. Características tales como incertidumbre profunda y proyecciones aparentemente contradictorias comúnmente representan una barrera para su uso por tomadores de decisión. El desarrollo de métodos para extraer información útil para los usuarios de los escenarios de cambio climático es un área de relativamente reciente desarrollo pero con un gran potencial. Con el fin de atender esta demanda, el MEICCA permite al usuario definir una variedad de índices de riesgo que se adapten a sus necesidades de información y que logren condensar la información contenida en el conjunto de escenarios disponibles. Cabe mencionarse que aquí el término riesgo se usa en su sentido amplio, no necesariamente basado en estimaciones objetivas de probabilidad sino tomando en cuenta la existencia de incertidumbre epistémica (ver Gay y Estrada, 2010).

A continuación se muestran ejemplos de los índices univariados y multivariados de riesgo que se pueden obtener de las proyecciones de clima a través del MEICCA. Los índices de riesgo más sencillos explotan el hecho de bajo el enfoque probabilístico adoptado, se puede caracterizar la distribución de posibles cambios en temperatura y precipitación. Por ejemplo, la Figura 4 paneles a) y b) muestra los percentiles 5 y 95, respectivamente, de los cambios proyectados en temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para México. Esta figura claramente sugiere que, aún en la cola izquierda de la distribución de cambios en temperatura (percentil 5), bajo el escenario RCP8.5 regiones como el norte y el centro sur del país podrían ver incrementos en la temperatura anual de entre 2.5°C y 3.5°C para finales de este siglo. En contraste, la Figura 4b muestra que bajo este escenario de emisiones los incrementos en temperatura anual podrían ser mayores a 5°C en gran parte del país. De forma similar, los paneles c) y d) muestran el percentil 5 y 95 para el caso de las proyecciones de precipitación bajo el escenario RCP8.5. Estos paneles permiten identificar, tomando en cuenta la incertidumbre en la sensibilidad del clima y en la regionalización obtenida por distintos modelos de clima, las regiones del país para las cuales existe mayor incertidumbre en precipitación. Las mayores reducciones en precipitación se podrían presentar en el sureste de México y a lo largo de la costa del Pacífico, mientras que los mayores aumentos en precipitación se podrían presentar en las regiones centro y noroeste del país.

Estos índices, en combinación con las estimaciones de media y mediana en la Figura 3, proveen una primera caracterización de la incertidumbre en las proyecciones de cambio climático para México a finales de siglo.

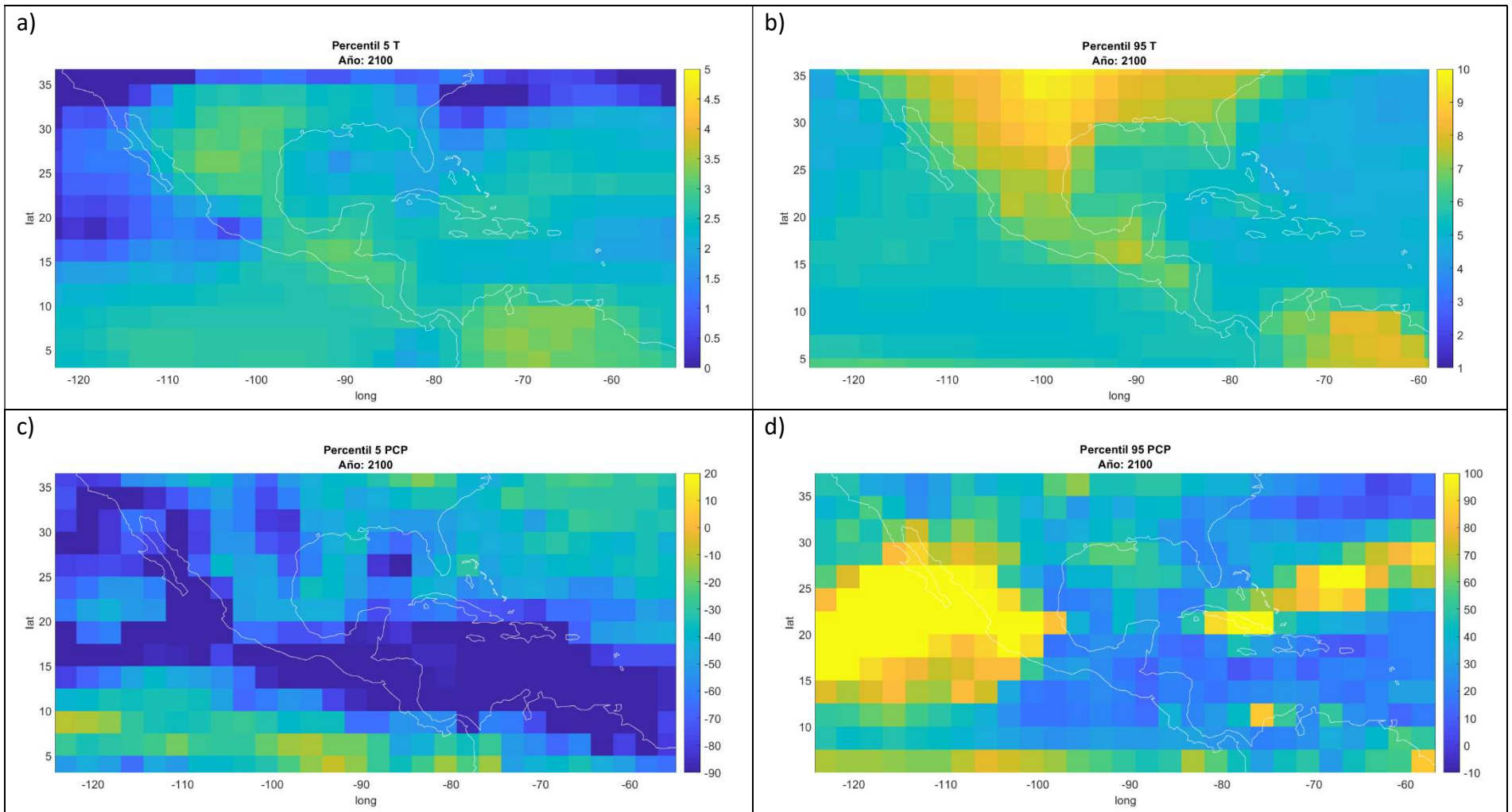
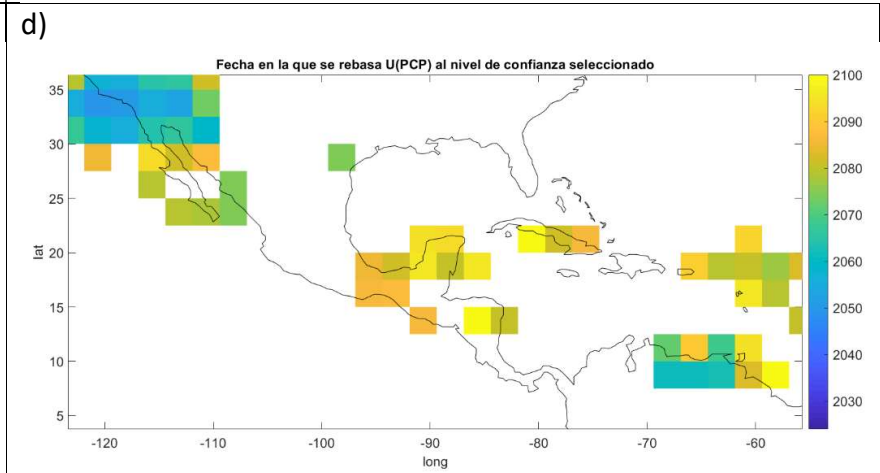
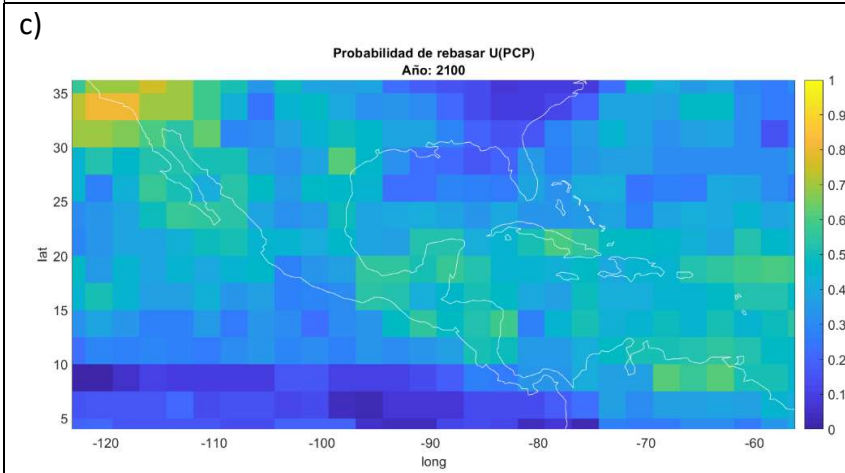
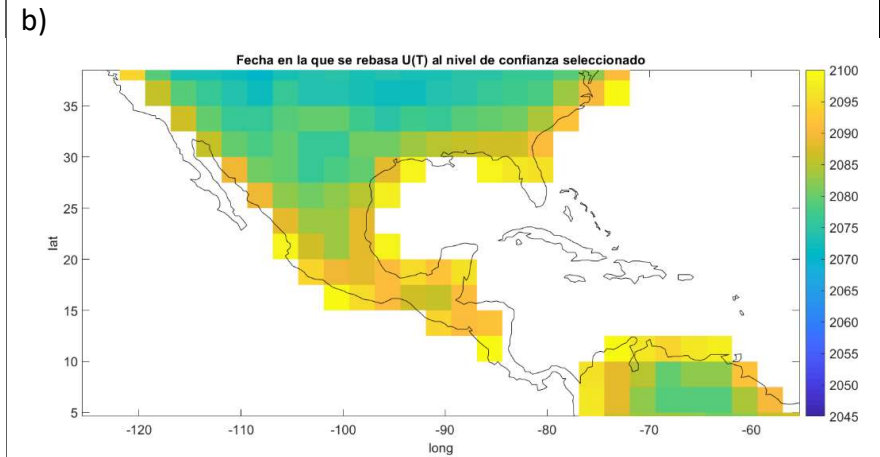
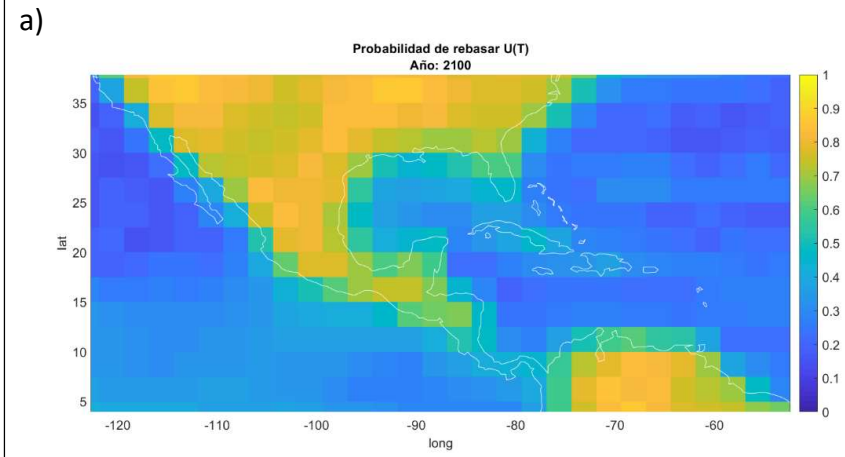


Figura 4. Percentiles 5 y 95 de la distribución de cambios en temperatura (paneles a y b; °C) y precipitación (paneles c y d; %).

El MEICCA produce otros índices que requieren la participación del usuario y que pueden proporcionar, en principio, información más útil y específica. Los ejemplos que se muestran a continuación se construyeron utilizando los siguientes criterios que serían obtenidos de un usuario del modelo. Supongamos que el usuario tiene interés en que los cambios en temperatura y precipitación no rebasen ciertos umbrales críticos, por ejemplo, 4°C en temperatura anual y -15% en precipitación anual. Adicionalmente, supongamos que el usuario selecciona un nivel de confianza del 50% (en este caso, nivel de confianza se interpreta como el porcentaje mínimo de simulaciones que deben rebasar el umbral).

La Figura 5 muestra índices univariados de riesgo para temperatura y precipitación utilizando la información proporcionada por el usuario. Paneles a) y c) muestran la probabilidad de rebasar un aumento de 4°C en la temperatura anual y una reducción de al menos 15% en la precipitación anual, respectivamente, en el año 2100 bajo el escenario RCP8.5. Como se puede observar en el panel a), la probabilidad de rebasar dicho umbral en temperatura es muy alta para todo el país; sólo en regiones como Yucatán las probabilidades son menores al 70%. En el caso de la precipitación (panel c), las probabilidades más altas de rebasar el umbral se encuentran en las regiones sur y noroeste del país, en donde alcanzan valores iguales o mayores a 50%.

Un índice de riesgo asociado a las medidas anteriores consiste en la estimación de fechas en las que el umbral seleccionado por el usuario sería rebasado, dado un cierto nivel de confianza que también es decidido por el usuario. Como se mencionó anteriormente, para los ejemplos presentados en este informe se escogió un nivel de confianza de 50% (esto es, se pide que al menos un 50% de las simulaciones indiquen que el umbral se rebasó por punto de malla). Los paneles b) y d) muestran las fechas en la que los umbrales seleccionados se rebasarían en temperatura y precipitación, respectivamente. Cabe resaltar que en todo el país se rebasará el umbral de temperatura durante este siglo. El umbral de un aumento de 4°C se rebasaría primero en la parte norte del país (alrededor de 2070) y se presentaría entre 15 y 30 años más tarde el sur del país y en zonas cercanas a la costa. El umbral de precipitación (-15%) durante este siglo únicamente se rebasará en algunas partes del país (Figura 5d): este umbral se rebasaría durante las décadas de 2060-2080 el noroeste del país y durante la década de 2080 en el centro y en la década de 2090 en el sureste de México.



De la misma forma, índices multivariados pueden ser construidos utilizando el MEICCA. La Figura 6 panel a) muestra la probabilidad conjunta de que se rebasen los dos umbrales seleccionados (4°C en temperatura anual y -15% en precipitación anual). Las probabilidades más altas de rebasar los umbrales críticos ocurren en el sureste y noroeste del país, alcanzando valores superiores al 50%. La Figura 6 panel b) proporciona las fechas en las que se rebasarían dichos umbrales de forma conjunta a un nivel de confianza del 50%: el noroeste es la región del país que primero rebasaría los umbrales (entre 2070 y 2085) mientras que el sureste alcanzaría estos cambios durante la última década del siglo.

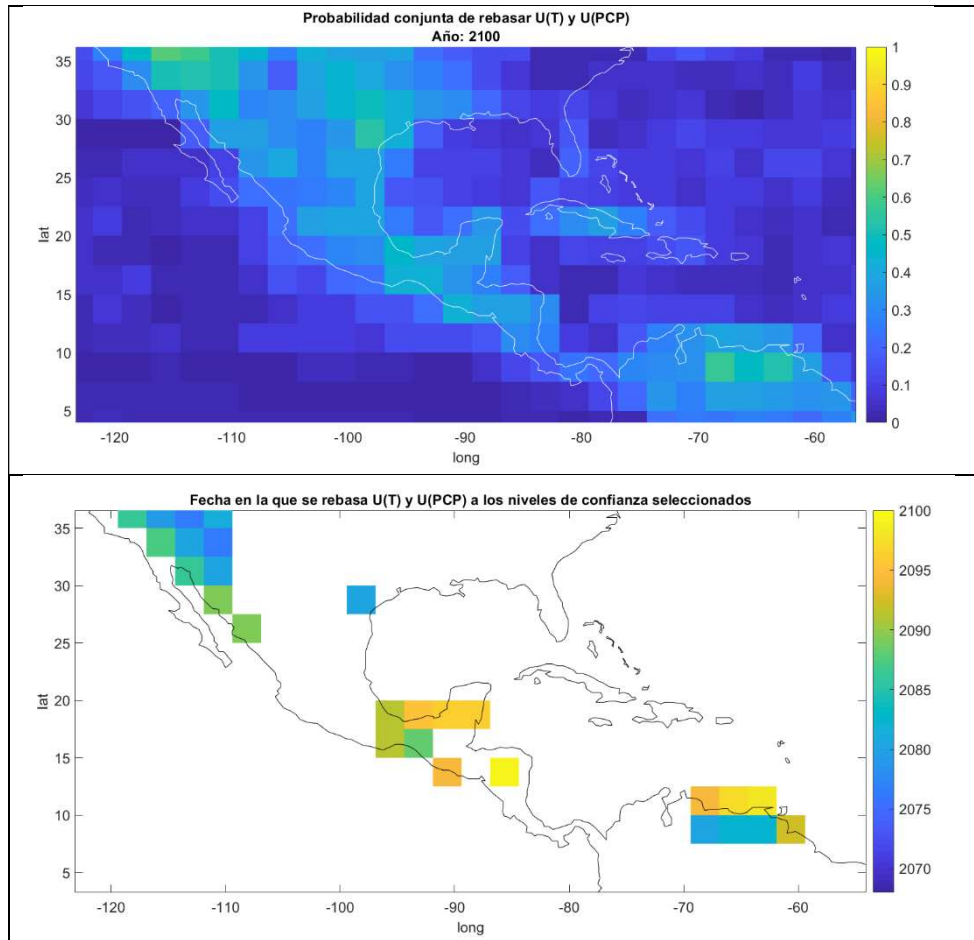


Figura 6. Índices de riesgo multivariados. Panel a) muestra la probabilidad conjunta de rebasar los umbrales críticos seleccionados (4°C de aumento en la temperatura anual; -15% de cambio en la precipitación anual). Panel b) muestra las fechas en las que dichos umbrales serían alcanzados por primera vez.

Funciones de impacto utilizadas en el MEICCA

El MEICCA actualmente utiliza dos conjuntos de funciones de impactos basadas en el modelo RICE2010 (Nordhaus y Boyer, 2003; Nordhaus, 2013): el primero será denominada RICE y el segundo RICE-P. En ambos casos, las funciones de impacto fueron primeramente modificadas para utilizar la temperatura local (por punto de malla con una resolución de 0.5°x0.5°) en lugar de la temperatura global, como ocurre con las funciones originales del modelo RICE2010. Las funciones RICE-P además incluyen la persistencia de los impactos de cambio climático sobre la economía, siguiendo lo propuesto por Estrada et al. (2015).

Las funciones de impacto del modelo RICE2010 fueron adecuadas de la siguiente forma para que fueran aplicables a escenarios de temperatura anual y PIB, ambos con una resolución de 0.5°x0.5°:

$$I_{r,t,i,j}^S = Y_{r,t,i,j} D_{r,t,i,j} S_{r,t} \quad (3)$$

En donde $I_{r,t,i,j}^S$, $Y_{r,t,i,j}$, $D_{r,t,i,j}$ representan el impacto económico ajustado, el PIB y el porcentaje de PIB perdido en el tiempo t , para cada coordenada i,j en la región r . El factor de ajuste es

$$S_{r,t} = I_{r,t} / I_{r,t}^* \quad (4)$$

donde $I_{r,t} = Y_{r,t} D_{r,t}$ y $I_{r,t}^*$ es la suma de $Y_{r,t,i,j} D_{r,t,i,j}$ sobre todos los puntos i,j en la región r . Esta modificación asegura que los impactos totales por región sean consistentes con aquellos que se obtendrían con la función de impacto original del modelo RICE2010.

Estrada et al. (2015) propone un tipo de funciones de impacto que recupera la dinámica y persistencia temporal que los shocks al PIB muestran empíricamente. En dicho artículo se muestra que las funciones de impacto en los modelos económicos de evaluación integrada asumen que los impactos de cambio climático no muestran persistencia alguna y que los sistemas afectados son capaces de recuperarse totalmente de los impactos ocurridos en el periodo inmediato anterior (lo que asume que los sistemas afectados tienen una capacidad de recuperación extremadamente grande y efectiva, que ocurre de inmediata, autónoma y gratuita, y todo esto sin importar la magnitud del impacto). Por el contrario, tanto la teoría de crecimiento económico como los estudios empíricos sobre las propiedades de series de tiempo del PIB han mostrado que los shocks introducidos en la economía tienen una enorme persistencia y tienden a disiparse después de periodos de tiempo considerables. La función de impacto dinámica tiene la siguiente forma:

$$I_{r,t} = Y_{r,t} D_{r,t} + \alpha_r I_{r,t-1} \quad (5)$$

En donde $I_{r,t}$, $Y_{r,t}$ son los impactos económicos y el PIB de la región r en el tiempo t , respectivamente, $0 \leq \alpha_r \leq 1$ es un parámetro de memoria y $D_{r,t}$ está dado por la ecuación (1). La Tabla 3 muestra los valores del parámetro α_r para cada una de las r regiones consideradas en este estudio. Dichos valores están basados en la Tabla 3 en Estrada et al. (2015). La elección de estos dos tipos de funciones de impacto tiene la ventaja de que permite cubrir gran parte del rango de la incertidumbre en la literatura sobre los costos económicos de cambio climático. Las funciones de impacto en RICE2010 son consideradas conservadoras, mientras que la función de impacto en Estrada et al. (2015) pertenece a literatura más reciente que considera que los costos de cambio climático han sido, en general, subestimados por los modelos de evaluación integrada comúnmente usados (e.g., Weitzman, 2009).

Tabla 3. Valores del parámetro de memoria α_r para cada región en este estudio.

Región	α_r	Región	α_r
EUA	0.60	MO	0.80
EU	0.50	África	0.90
Japón	0.60	LA	0.65
Rusia	0.80	OHI	0.60
EA	0.70	OASIA	0.80
China	0.80	MX	0.65
India	0.80		

Procedimiento para la generación de escenarios de producto interno bruto

El procedimiento que se siguió para producir los escenarios SSP espacialmente explícitos fue el siguiente:

- Las bases de datos utilizadas son: 1) Los escenarios socioeconómicos regionalizados y espacialmente explícitos del Greenhouse Gas Initiative Scenario Data Base del International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA; <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/GGI/DB/>); 2) Los escenarios regionalizados del SSP Database de IIASA (<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>).
- Para combinar las dos bases de datos se siguió la correspondencia entre los escenarios de desarrollo en el SRES y SSP (ver, van Vuuren y Carter, 2014).
- Tanto los escenarios del Greenhouse Gas Initiative Scenario Data Base como del SSP Database originalmente tienen una frecuencia decenal. Todos los datos se interpolaron a una frecuencia anual.

- Los patrones de escala de desarrollo descritos por las familias A2, B1/A1 y B2 fueron obtenidos escalando cada punto en la malla por el PIB global anual. Cabe señalarse que, a diferencia de los patrones de escala utilizados para la generación de escenarios de clima, los patrones de escala del PIB son no estacionarios.
- Los escenarios SSP globales fueron proyectados en una malla regular de 0.5°x0.5° utilizando los patrones de escala obtenidos en el paso anterior.

Se construyeron escenarios para las líneas de desarrollo SSP1, SSP2, SSP3, SSP4 y SSP5 que se basan en los patrones regionales antes mencionados y las proyecciones de PIB global producido por los grupos de modelación IIASA, OCDE y PIK.

Estimación de los impactos de cambio climático para México

En esta sección se presentan los resultados principales de la estimación de los costos de cambio climático para México, utilizando un escenario de referencia en clima (RCP8.5), dos de política (INDC y RCP3PD), así como dos escenarios socioeconómicos (SSP3 y SSP5) y dos funciones de impacto. El escenario sobre la implementación estricta de INDC se obtuvo utilizando el programa C-ROADS. Se calculó la diferencia entre el escenario INDC y el RCP8.5 obtenidos con este programa y se restó el resultado al escenario RCP8.5 obtenido usando el MAGICC 6. El escenario INDC estricto en C-ROADS asume que después del periodo de compromiso 2025-2030, los países desarrollados no se comprometen a continuar reduciendo emisiones y que los países en desarrollo no implementan más acciones. Para la estimación de los impactos se utilizó la mediana de las proyecciones de temperatura anual únicamente debido a la capacidad de cómputo disponible para la realización de este proyecto. En este informe se toman 3 medidas resumen para describir la magnitud de los costos de cambio climático: 1) el valor presente de los impactos de cambio climático acumulados durante este siglo (en miles de millones de US\$2005); 2) la proporción entre el valor presente de los impactos acumulados y el valor presente del PIB acumulado durante este siglo (proporción impacto/crecimiento) y; 3) el valor presente de los impactos acumulados como porcentaje del PIB en el año inicial. En los cálculos de valor presente se utilizó una tasa de descuento de 4%.

La Figura 7 ilustra la distribución espacial de los impactos económicos de cambio climático en México para las dos funciones de impacto descritas anteriormente y bajo el escenario de referencia RCP8.5. Como se muestra en esta figura, los impactos económicos de cambio climático no se distribuirán de manera homogénea en el territorio, sino que serán mucho mayores en las zonas con mayor desarrollo socioeconómico, simplemente debido a que existe una mucho mayor exposición.

La primera columna de la Tabla 4 muestra el valor presente de los costos de cambio climático acumulados durante el presente siglo para México. Dependiendo de la función de impacto y del tipo de desarrollo económico, las pérdidas para México varían en un rango de 480 miles de millones de dólares a alrededor de 3 billones de dólares dependiendo fuertemente del crecimiento del PIB y de la función de impacto utilizada.

Estas pérdidas equivaldrían a perder alrededor del 0.8% del crecimiento económico durante este siglo. Si se permite que los impactos de cambio climático en el PIB tengan una persistencia similar a aquella de otros shocks, cambio climático podría representar perder alrededor del 2% del crecimiento durante este siglo.

Otra medida utilizada para dar una idea de la magnitud de los costos de cambio climático consiste en comparar el valor presente de los impactos acumulados durante el siglo con el valor del PIB en el periodo inicial. Esta medida es problemática porque depende fuertemente del crecimiento asumido y porque además compara un flujo (los costos de cambio climático durante el siglo) con un stock (el PIB del año inicial). Dependiendo del escenario económico y de la función de impacto, el valor presente de los costos acumulados de cambio climático sería comparable a entre 50% y 100% del PIB actual utilizando la función de impacto del RICE y entre 130% y 250% si se considera la persistencia de los impactos (RICE-P). Estas estimaciones contrastan fuertemente con aquellas en La Economía del Cambio Climático en México (SEMARNAT-SHCP, 2010), en donde el valor presente de los impactos acumulados durante el siglo representa tan sólo el 6% del PIB actual (ver Estrada et al., 2013).

Tabla 4. Estimación de los impactos económicos para México bajo el escenario de referencia RCP8.5 y de las pérdidas evitadas bajo los escenarios de política INDC y RCP3PD.

Escenario	RCP8.5	INDC (Pérdidas evitadas)	RCP3PD (Pérdidas evitadas)
RICE SSP3	480 (52) [0.8]	123	329
RICE SSP5	1,141 (96) [0.8]	297	792
RICE-P SSP3	1,253 (135) [2.1]	317	853
RICE-P SSP5	2,973 (249) [2.2]	765	2,048

Miles de millones US\$2005. En paréntesis se muestra el valor presente de los impactos acumulados como porcentaje del PIB en el año inicial. En corchetes se muestra la proporción impacto/crecimiento, es decir la proporción entre el valor presente de los impactos acumulados y el valor presente del PIB acumulado durante este siglo.

Las estimaciones de los beneficios para México de la implementación de medidas internacionales de mitigación proveen un límite superior de inversión para implementar los compromisos asumidos. En el caso de un escenario tipo INDC, el valor presente de las pérdidas evitadas para México estaría alrededor de entre 100 y 750 miles de millones de dólares (entre 10% y 60% del PIB inicial de México), de dependiendo del escenario de crecimiento económico y de la función de impacto utilizados. Bajo un escenario de política tipo RCP3PD, que equivale aproximadamente a un escenario de estabilización en alrededor de 1.5°C por encima de las temperaturas preindustriales, las pérdidas evitadas para México serían entre 300 y 2,000 miles de millones de dólares (cerca de 3 veces aquellos obtenidos bajo un escenario tipo INDC).

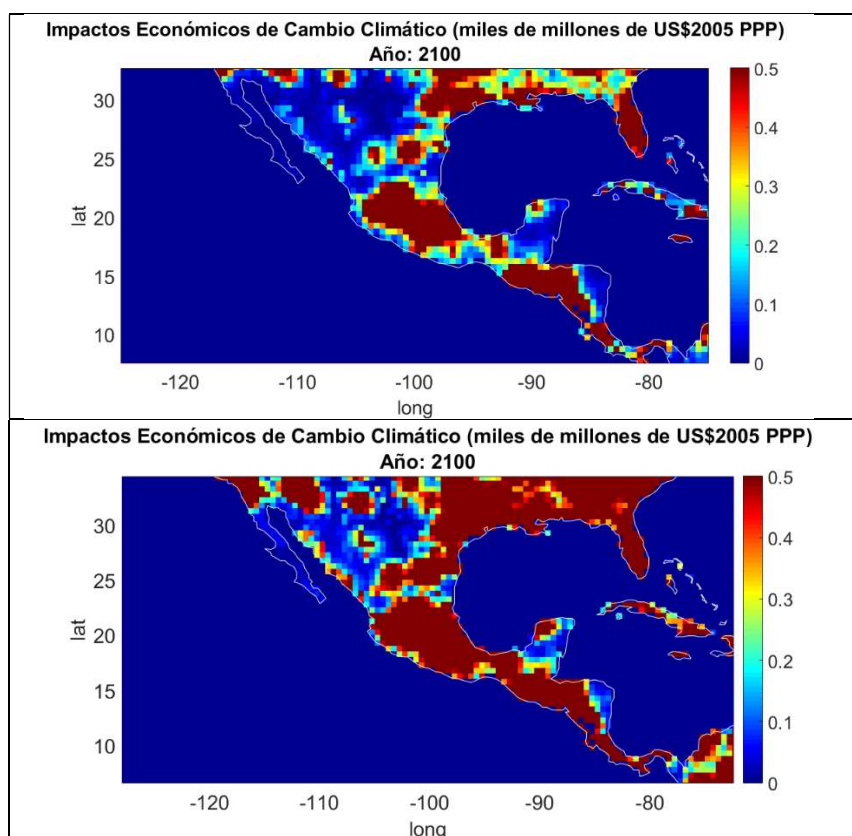


Figura 7. Impactos económicos de cambio climático en miles de millones de US\$2005 en el 2100. Paneles a) y b) muestran los impactos económicos de cambio climático en el 2100 para México para las funciones de impacto RICE y RICE-P, respectivamente, bajo los escenarios RCP8.5 y SSP5.

Conclusiones

Este proyecto permitió avanzar de manera importante en el modelo MEICCA, en particular en lo que se refiere a extender el módulo de clima para incluir la incertidumbre proveniente de la sensibilidad del clima. Se reportan medidas univariadas y multivariadas de riesgo que pueden ser definidas por el usuario y permiten extraer información que potencialmente sea más relevante para apoyar la toma de decisiones.

En este reporte se presentan primeras estimaciones de los costos de cambio climático para México, así como de los beneficios en términos de pérdidas evitadas. Para ello se utilizan dos escenarios de crecimiento económico contrastantes, dos funciones de impacto de las cuales una puede considerarse como conservadora y la otra más de acuerdo con la literatura reciente que advierte que los costos económicos de cambio climático podrían estar subestimados. También se utiliza un escenario de referencia (RCP8.5) y dos de política (INDC y RCP3PD).

El valor presente de los costos acumulados de cambio climático sería comparable a entre 50% y 100% del PIB actual utilizando la función de impacto del RICE y entre 130% y 250% si se considera la persistencia de los impactos (RICE-P). Estas estimaciones contrastan fuertemente con aquellas en La Economía del Cambio Climático en México (SEMARNAT-SHCP, 2010), en donde el valor presente de los impactos acumulados durante el siglo representa tan sólo el 6% del PIB actual (ver Estrada et al., 2013). En general se muestra que para México gran parte de los impactos económicos de cambio climático (en términos absolutos) se presentarán en las zonas central, centro occidental, y noreste de México, y en algunas partes del sur (Tabasco y Mérida). Los beneficios para México de la implementación de los INDC son considerables (entre 100 y 800 mil millones de dólares) y éstos podrían casi triplicarse si se alcanzara un acuerdo internacional que limitara el aumento en la temperatura global a 1.5°C.

Referencias

- Ackerman F, 2008. Critique of Cost-Benefit Analysis, and Alternative Approaches to Decision-Making. A report to Friends of the Earth England, Wales and Northern Ireland. Disponible en http://www.ase.tufts.edu/gdae/Pubs/rp/Ack_UK_CBACritique.pdf.
- Estrada F. & Tol R.S.J. (2015b) Towards Impact Functions for Stochastic Climate Change. *Climate Change Economics* 06, 1550015 DOI: 10.1142/S2010007815500153
- Estrada F., Martínez B. (2011). *Economía del Cambio Climático en la Ciudad de México*. Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México. Universidad Nacional Autónoma de México. 88 pp. ISBN: 978-607-02-2112-5.
- Estrada F., Papyrakis E., Tol R.S.J., & Gay-García C. (2013). The economics of climate change in Mexico: implications for national/regional policy. *Climate Policy*, 13(6):738-750.
- Estrada F., Tol R.S.J. (2015c). Extending integrated assessment models' impact functions to include adaptation and dynamic sensitivity. *Sometido a Environmental Modelling and Software*.
- Estrada F., Tol R.S.J. (2015d). Estimating the Global Impacts of Climate Variability and Change During the 20th Century. *Sometido a Climate Research*.
- Estrada F., Tol R.S.J., & Gay-García C. (2015a). The persistence of shocks in GDP and the estimation of the potential economic costs of climate change. *Environmental Modelling and Software*, 69:155-165.
- Gay C., Estrada F. (2010). Objective probabilities about future climate are a matter of opinion. *Climatic Change*, 99(1-2): 27-46, DOI: 10.1007/s10584-009-9681-4.
- Giupponi C., Borsuk M.E., de Vries B.J., Hasselmann K. (2013). Innovative approaches to integrated global change modelling. *Environ. Model Softw.* 44, 1e9.
- Hulme M, Wigley TML, Brown EM, Raper SCB, Centella A, Smith S, Chipanshi AC, 2000. Using climate scenario generator for vulnerability and adaptation assessment: MAGICC and SCENGEN. Version 2.4 Workbook, Climate Research Unit, Norwich, UK, 52 pp
- INE-SEMARNAT, 2009. Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México D.F
- Jakeman A.J., Letcher R.A., Norton J.P. (2006). Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environ. Modell. Softw.* 21 (5), 602e614.
- Jaynes ET, 1957. Information theory and statistical mechanics. *Phys Rev* 106(4):620–630
- Jaynes ET, 1962. Information theory and statistical mechanics. In: Ford KW (ed) Brandeis University Summer Institute lectures in theoretical physics, vol 3. Benjamin, New York, pp 181–218
- Nordhaus W.D. (2013). *The climate casino: Risk, uncertainty, and economics for a warming world*. Yale University Press.
- Nordhaus WD, 2013. *The climate casino: Risk, uncertainty, and economics for a warming world*. Yale University Press.
- Nordhaus WD, Boyer J, 2003. *Warming the World: Economic Models of Global Warming*. MIT Press.
- Santer BD, Wigley TML, Schlesinger ME, Mitchell JFB, 1990. Developing climate scenarios from equilibrium GCM results, Hamburg, Germany.

Stern N. (2007). *The economics of climate change: the Stern review*. Cambridge University Press

Tebaldi C, Arblaster JM, 2014. Pattern scaling: Its strengths and limitations, and an update on the latest model simulations. *Clim. Change* 122, 459–471. doi:10.1007/s10584-013-1032-9.

Weitzman M.L. (2009). On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change. *Rev. Econ. Stat.*, 91 (1): 1–19.