



Environment  
Canada

Environnement  
Canada

SEMARNAT  
SECRETARÍA DE  
MEDIO AMBIENTE  
Y RECURSOS NATURALES



INECC  
INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA  
Y CAMBIO CLIMÁTICO



Al servicio  
de las personas  
y las naciones

# Evaluación de los efectos del cambio climático en el crecimiento económico de México

Informe Final

2018

Documento generado a  
partir de los resultados  
de la consultoría  
realizada por:

Armando Sánchez  
Vargas

Serie

2

Evaluación y mapeo de la vulnerabilidad  
y los riesgos climáticos

Derechos Reservados © 2018

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Colonia Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CP.11000, Ciudad de México.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, CP. 14210, Ciudad de México.

Todos los derechos están reservados. Ni esta publicación ni partes de ella pueden ser reproducidas, almacenadas mediante cualquier sistema o transmitidas, en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, de fotocopiado, de grabado o de otro tipo, sin el permiso previo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

El análisis y las conclusiones aquí expresadas no reflejan necesariamente las opiniones del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, de su Junta Ejecutiva, de sus Estados Miembros, o del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

Documento generado a partir de los resultados de la consultoría realizada por: Armando Sánchez Vargas.

Citar como:

PNUD México-INECC. 2018. *Evaluación de los efectos del cambio climático en el crecimiento económico de México*. Proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México”. 50 pp. Armando Sánchez Vargas. México.

Esta publicación fue desarrollada en el marco del proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México” del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

Agradecimiento:

Al gobierno de Canadá a través de Environment Canada por el apoyo financiero recibido para el desarrollo del proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México”, durante 2014-2018. Al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático por el apoyo prestado para el buen desarrollo de la Plataforma.

# Contenido

<b>1. Resumen ejecutivo.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Introducción .....</b>	<b>9</b>
<b>3. Marco teórico.....</b>	<b>11</b>
3.1 Relación histórica entre el clima y crecimiento económico. ....	11
3.2 Impacto del cambio climático en el crecimiento del producto global en las economías. ....	12
3.3 Impacto del cambio climático por nivel de desarrollo de los países.....	14
3.4 Impacto del cambio climático por sectores económicos. ....	15
3.4.1 Agricultura y pesca.....	16
3.4.2 Sector industrial, comercial y de servicios.....	18
3.5 Impacto del cambio climático en otras variables socioeconómicas.....	19
3.6 Resumen del estado actual del conocimiento .....	20
<b>4. Estadística descriptiva.....</b>	<b>22</b>
4.1 Relación entre el clima y el PIB per cápita de los estados.....	22
4.2 Relación entre el cambio climático y el crecimiento económico de los estados. ....	24
<b>5. Metodología.....</b>	<b>25</b>
5.1 Modelos de corrección de error .....	25
5.2 Modelo panel .....	26
5.2.1 Modelo de efectos fijos .....	27
5.2.2 Modelo de efectos aleatorios.....	28
5.2.3 Consideraciones para la selección del modelo de panel.....	28
<b>6. Estimación econométrica.....</b>	<b>29</b>
6.1 Estimaciones con base en modelos de series de tiempo .....	29
6.1.1 Impacto del cambio en la temperatura y en la precipitación sobre el crecimiento del PIB per cápita .....	30
6.1.2 Escenarios de crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con diferentes contextos de precipitación y temperatura, 2014-2100.....	35

6.2	Estimaciones con base en modelos de panel .....	41
<b>7</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>44</b>
<b>8</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>46</b>
<b>9</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>48</b>
	Anexo A.1. Crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con escenarios de temperatura y precipitación nacional.....	48

## Lista de Gráficas

Gráfica 1. Relación histórica entre temperatura y PIB per cápita, 1940-2015.....	22
Gráfica 2. Relación entre la tasa de crecimiento de la temperatura y la tasa de crecimiento del PIB per cápita, 1940-2015. ....	24
Gráfica 3. Impacto del cambio en la temperatura en 1.0°C, 1.5°C y 2°C sobre la tasa de crecimiento del PIB per cápita estatal.....	32
Gráfica 4. Impacto del cambio en la precipitación en 1 mm, 25 mm y 50 mm sobre el PIB per cápita estatal.....	33
Gráfica 5. Impacto del cambio en la temperatura en 1.0°C, 1.5°C y 2°C sobre la tasa de crecimiento del PIB per cápita nacional.....	34
Gráfica 6. Impacto del cambio en la precipitación en 1 mm, 25 mm y 50 mm sobre el PIB per cápita nacional .....	35
Gráfica 7 A1. Crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con escenarios de temperatura para México (1941-2100).....	48
Gráfica 8 A1 Crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con escenarios de temperatura para México (1941-2100).....	49

## Lista de Tablas

Tabla 1. Impacto de variaciones en la temperatura y la precipitación estatal en el crecimiento del PIB per cápita.....	31
Tabla 2. Escenarios de impacto en la tasa media de crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con diferentes proyecciones de temperatura por estados. ....	37
Tabla 3. Escenarios de impacto en la tasa media de crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con diferentes proyecciones de precipitación. ....	39
Tabla 4. Escenarios de impacto en la tasa media de crecimiento del PIB per cápita nacional de acuerdo con proyecciones de temperatura.....	40

Tabla 5. Escenarios de impacto en la tasa media de crecimiento del PIB per cápita nacional de acuerdo con proyecciones de precipitación. ....	40
Tabla 6. Impacto del cambio en la temperatura en el crecimiento del PIB per cápita.....	42
Tabla 7. Impactos del cambio en la precipitación en el crecimiento del PIB per cápita .....	43

## Lista de Mapas

Mapa 1. PIB per cápita por estados.....	23
---	----

## 1. Resumen ejecutivo

Este estudio analiza los efectos del cambio climático sobre el crecimiento económico en México a escalas nacional y subnacional y la relación que existe entre el crecimiento del Producto Interno Bruto per cápita (PIB per cápita), y las variables climáticas de temperatura y precipitación. Se utilizan otras variables determinantes del crecimiento económico para controlar la relación estadística planteada.

El análisis comprende dos tipos de estimaciones: impactos y escenarios. Los resultados de impacto se refieren a una relación causal, es decir representan la elasticidad temperatura del PIB y la elasticidad precipitación del PIB. Dicha relación es estimada por medio de un modelo de regresión para el período 1940-2013.

Por su parte, los escenarios se desarrollan con base en dichos resultados de impacto, contemplan las ocho diferentes proyecciones de temperatura y precipitación desarrolladas por el IPCC (Representative Concentration Pathways) y se estiman para el período 2014-2100.

La metodología para estimar los impactos consiste en modelos de corrección de error (ECM, por sus siglas en inglés) y se corroboran mediante modelos de panel.

Los resultados de impacto para los 32 estados analizados muestran que un aumento en 1°C en la temperatura media, podría reducir el PIB per cápita nacional en un rango de entre -0.77 y -1.76 por ciento, de acuerdo con los datos observados durante el período 1940-2013.

El estudio también muestra que existe heterogeneidad en los impactos entre las diferentes entidades federativas; el de mayor vulnerabilidad ante cambios en la temperatura es Baja California Norte (-7.52 por ciento) y el de menor impacto es Sinaloa (-0.33 por ciento).

En términos de la variación en la precipitación el aumento de 1 mm en esta generaría una pérdida del PIB per cápita de entre -0.01 y -0.04 por ciento. Coahuila es el estado con mayor reducción en su PIB per cápita (-0.27 por ciento), como consecuencia de la variación en la precipitación.

Por su parte, nuestros escenarios económicos muestran que los cambios en las variables climáticas que se proyectan para finales del siglo XXI tendrían como consecuencia una caída en la tasa de crecimiento del PIB per cápita en el periodo 2014-2100, esto tanto a nivel nacional como para todos los estados.

De acuerdo con las simulaciones, los cambios en la temperatura podrían disminuir el crecimiento del PIB per cápita del país entre -1.96 y -2.03 por ciento hacia el año 2100. Por su parte, el cambio en la precipitación podría reducir el crecimiento en un rango de entre -1.03 y -1.66 por ciento para el mismo período.

Los resultados de este estudio se encuentran en función de la calidad y disponibilidad de los datos climáticos y económicos, lo cual es una de las limitantes de la investigación. Sin embargo, las estimaciones realizadas mediante modelos de panel confirman la robustez de los resultados obtenidos por modelos de series de tiempo. Ambos resultados muestran que los cambios en la temperatura y en la precipitación tendrán efectos negativos sobre el crecimiento económico per cápita del país.

Estos hallazgos nos permiten señalar la importancia del impulso a las políticas de control y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. El desarrollo de estas políticas permitirá, además de la sustentabilidad ambiental, una mejor promoción del crecimiento económico.





## 2. Introducción

El concepto de clima se refiere al comportamiento promedio de largo plazo de las condiciones atmosféricas: temperatura, humedad, precipitación y viento. El concepto de cambio climático alude al cambio en las medias de largo plazo de dichos componentes atmosféricos (NASA, 2015).

La medición de las condiciones atmosféricas se realiza mediante la recolección de datos de estaciones terrestres y satelitales. Esta medición se instrumentó de manera formal desde mediados del siglo XVIII, sin embargo, también ha sido posible reconstruir datos de clima desde épocas remotas, lo cual proporciona un contexto de más largo plazo sobre las medias y la variabilidad de las condiciones atmosféricas (IPCC, 2014).

Con base en la observación, ha sido posible detectar cambios significativos en las condiciones climáticas alrededor del mundo. La temperatura promedio ha sufrido un considerable aumento en el último siglo, con los mayores cambios en las tres últimas décadas.

En términos del ciclo del agua, los cambios no han sido uniformes en todas las regiones, de manera que existen zonas que sufren sequías drásticas y otras donde las precipitaciones extremas se han acentuado.

Si bien los cambios en el clima tienen un componente natural, investigaciones previas a este estudio demuestran que los cambios de las condiciones climáticas están asociados con las actividades antropogénicas (IPCC, 2014). Las perspectivas indican que el cambio climático será mayor en las siguientes décadas y se manifestarán otros importantes cambios en el clima durante el siglo XXI (Nordhaus, 1991).

En cuanto a impactos económicos de este proceso climático, se sabe que el aumento de las temperaturas y la variabilidad en los patrones de lluvia frenarán el crecimiento de los países; se complicará la reducción de la pobreza y se ampliará la inseguridad alimentaria.

La medición de los impactos económicos globales del cambio climático aún representa un gran reto (IPCC, 2014). Los estudios sobre impactos del cambio climático en México enfrentan una gran incertidumbre en los resultados además de dificultades metodológicas (Estrada et al., 2013), por ello que el objetivo principal de este estudio es realizar una evaluación cuantitativa sobre los efectos del clima en el crecimiento económico de México a escala nacional, subnacional y, bajo diferentes escenarios de cambio climático.

Se busca analizar la relación que existe entre las tasas de incremento de la temperatura y la precipitación, con el PIB per cápita, así como con variables socioeconómicas determinantes para inferir el efecto del clima en el crecimiento económico durante un periodo histórico de 1940 a 2013.

La metodología empleada para la estimación de los impactos incluye series de tiempo mediante modelos de corrección de error; con base en esas estimaciones se realizan simulaciones de crecimiento económico para el año 2100 en el contexto de los ocho diferentes *Representative Concentration Pathways* (RCP, por sus siglas en inglés) que consisten en proyectar la temperatura y precipitación desarrolladas por el IPCC. Para corroborar la robustez de los resultados obtenidos con series de tiempo, se incorporó la metodología de panel.

El documento se encuentra estructurado como sigue. El capítulo dos revisa los principales hallazgos de los estudios previos en términos de impactos y proyecciones del cambio climático. El capítulo tres presenta un resumen estadístico de la relación entre temperatura y precipitación con respecto al crecimiento económico. El capítulo cuatro desarrolla la metodología econométrica. Los resultados de impacto y las proyecciones de crecimiento son presentados en el apartado cinco. Finalmente, el capítulo seis concluye.

### 3. Marco teórico

La relación entre las variables económicas y climáticas ha sido estudiada desde diferentes enfoques.

Los primeros estudios en torno a este tema se centraron en estudiar cómo el crecimiento económico se ve influenciado por las condiciones climáticas y geográficas que históricamente han caracterizado a los países. Se sabe que los países que se ubican en las zonas de los trópicos y cuyas temperaturas son altas, en general, están asociados a ingresos más bajos que aquellos países localizados en zonas más alejadas de los trópicos y con temperaturas templadas.

Posteriormente, en la literatura se tomó relevante interés en el análisis de cómo el cambio climático incide sobre el crecimiento económico de los países. Esta relación ha sido medida principalmente en términos del impacto en el producto global de las economías, sin embargo, también se han hecho estimaciones de manera más específica, para diferentes grupos de países y por sectores productivos.

En este sentido, este capítulo clasifica la revisión de la literatura de la siguiente manera:

1. Relación histórica entre clima y crecimiento económico
2. Impacto del cambio climático en el crecimiento del producto global de las economías
3. Impacto del cambio climático por nivel de desarrollo de los países
4. Impacto del cambio climático por sectores económicos
5. Impacto del cambio climático en otras variables socioeconómicas.

#### 3.1 Relación histórica entre el clima y crecimiento económico.

Diversos estudios han analizado la importancia del clima y la ubicación geográfica en el crecimiento de las economías. Al respecto, Gallup et al. (1999) examinan la relación entre variables geográficas y macroeconómicas para un conjunto de 150 países, con la finalidad de conocer si los elementos geográficos son un determinante del crecimiento económico. Emplean un modelo de función de producción, mediante el cual controlan por otras variables de tipo económico, político e institucional, además de las de tipo geográfico. En el estudio se muestra que la localización y el clima se relacionan con el nivel de ingresos de los países, así como con su la tasa de crecimiento.

Identificaron que las economías situadas cerca de los trópicos son, casi en su totalidad pobres y que los países con alto ingreso se ubican, en su mayoría, en las latitudes medias y altas. Los

autores encuentran que los canales mediante los cuales el clima incide sobre la economía son principalmente: los costos de transporte, la carga por enfermedades y la productividad del sector agrícola.

Por otro lado Horowitz (2009) revisa la relación histórica entre el clima y el PIB per cápita para el grupo de los 100 países más poblados. Aplica un modelo de crecimiento de Solow-Swan e incluye a la temperatura en el enfoque. Los resultados señalan que en promedio, los países que presentan mayores temperaturas son también más pobres que aquellos con temperaturas más bajas.

Sachs (2001) presenta evidencia de la importancia de la geografía en el desarrollo económico de los países. La hipótesis desarrollada en su trabajo apunta que los países situados en los trópicos tienen un menor desarrollo económico en comparación con aquellos que se ubican fuera de esta zona geográfica. Uno de sus principales hallazgos es que existen diferencias importantes en el ingreso per cápita por zonas climáticas. Los países ubicados en la región de los trópicos son, en su mayoría, economías pobres, mientras que los países situados a mayores distancias de los trópicos presentan un mejor nivel económico.

***HALLAZGO DE LA LITERATURA #1 Los países pobres están caracterizados por presentar en su mayoría temperaturas altas y ubicarse por lo general en regiones tropicales. En cambio, los países ricos presentan mayormente temperaturas templadas y su localización es más lejana a los trópicos.***

---

### **3.2 Impacto del cambio climático en el crecimiento del producto global en las economías.**

El estudio de los impactos económicos del cambio climático ha tomado gran relevancia en las últimas décadas. Un estudio importante es el desarrollado por Tol (2009), el cual hace una revisión de los principales documentos que han estimado los impactos económicos del cambio climático. El autor presenta los dos principales enfoques utilizados en el análisis del tema: el método numerativo y el método estadístico.

El primero consiste en estimar los efectos físicos del cambio climático, obtenidos con base en investigaciones de las ciencias naturales que pueden estar basadas en la combinación de diversos modelos de evaluación de impacto climático, así como de experimentos de laboratorio. Una vez calculados los impactos físicos es que se asigna a estos un precio, y puede, entonces, conocerse el impacto económico.

El segundo se basa en la estimación directa de los impactos del clima en el bienestar y en el producto de la economía. Ambos métodos presentan tanto ventajas como limitaciones.

El autor encuentra que los resultados son consistentes a pesar de que los estudios emplean diferentes metodologías. La recopilación indica que la mayor estimación de cambio en la temperatura es de 3°C, con un impacto económico global máximo de 4.8 por ciento del PIB.

Con base en esos datos, el autor señala que el impacto económico del cambio climático es relativamente pequeño, lo cual podría tener implicaciones para la toma de decisiones de política, sobre todo en cuanto a la disminución óptima de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Dell et al. (2009) examinan la relación existente entre la temperatura y el ingreso per cápita a nivel municipal para 12 países de América. Realizan un modelo de sección cruzada, mismo que comparan y encuentran consistente con los resultados obtenidos en su modelo previo (2008) de datos panel para un grupo de países.

Sus resultados muestran que un aumento de 1°C en la temperatura está asociado con una disminución en el PIB per cápita municipal, la cual va de 1.2 por ciento a 1.9 por ciento en el período 1950-2000. Su principal conclusión es que existe una relación entre el comportamiento de las temperaturas y el ingreso que perciben los individuos tanto entre países como al interior de éstos.

Horowitz (2009) señala en el estudio de la relación entre temperatura y los ingresos de los diferentes países, que requiere de la separación de los efectos históricos y los contemporáneos. El efecto histórico de la temperatura puede ser representado por medio de las tasas de mortalidad desde la época colonial, tal como lo sugiere el enfoque de las instituciones.

Con dichos datos, el estudio realiza un pronóstico del impacto que tendría un aumento de 1°C en la temperatura. Los resultados estiman que dicho aumento generaría una pérdida de 3.8 por ciento del PIB mundial.

Barrios et al. (2010) estiman la relación entre los patrones de precipitación y el crecimiento económico mediante un modelo de panel para un grupo de países pobres en la región de África Subsahariana. Se basan en un modelo de crecimiento económico neoclásico, en el cual asumen la convergencia condicional.

Los hallazgos del modelo apuntan que la caída en el nivel de precipitación tiene una incidencia negativa sobre el crecimiento de los países africanos. Sin embargo, cuando los autores comparan los resultados de esta región con los de otros países en desarrollo encuentran que la relación no es así para los demás países analizados. Además, estudian los canales mediante los cuales el nivel de precipitación incide sobre el producto de la región, encuentran que existen dos principales medios de incidencia: la agricultura y el suministro de energía hidroeléctrica.

Adicionalmente, Nordhaus (2006) realiza un estudio en el cual relaciona las variables geográficas y económicas. Su aportación más importante es que incorpora un análisis de la actividad económica mundial a un nivel de celdas con resolución de 1° latitud por 1° longitud.

La estimación de los impactos del cambio climático se hace con base en la comparación de dos de los escenarios propuestos por el IPCC.

El primero asume un cambio de 3°C y la precipitación no mostrará cambios. El segundo plantea un cambio en la temperatura de 3°C y, muestra una reducción en la precipitación de 15 por ciento para el caso de las zonas de 500 km de distancia de la costa en las latitudes medias (latitud 20 a 50 norte y sur). Mientras que en el caso de otras áreas, la precipitación aumenta un 7 por ciento.

Los resultados para el primer escenario muestran que el impacto económico es de entre -0.93 por ciento y -1.73 por ciento; y en el segundo los resultados se agravan considerablemente, con un impacto económico de hasta -2.95 por ciento.

***HALLAZGO DE LA LITERATURA #2** Las variaciones en el clima provocadas por el cambio climático, específicamente el aumento en la temperatura y las modificaciones en los patrones de precipitación, tienen efectos negativos sobre el crecimiento económico y bienestar de los países.*

---

### **3.3 Impacto del cambio climático por nivel de desarrollo de los países.**

Los resultados de Tol (2009) encuentran que los países más desarrollados son quienes generan las mayores emisiones de gases de efecto invernadero, sin embargo, son los más pobres los que enfrentan más riesgos como consecuencia del cambio en las temperaturas.

Dell et al. (2012) estudian el impacto de las variaciones de la temperatura sobre el producto de la economía, mediante un panel para 125 países, los resultados muestran que las temperaturas altas tienen efectos significativamente negativos en el crecimiento de las economías, principalmente en los países más pobres.

También encuentran que las altas temperaturas reducen el crecimiento económico de los países pobres, de manera que un incremento de 1°C provoca una reducción de 1.3 puntos porcentuales en el crecimiento de la economía. Por otro lado las altas temperaturas reducen el nivel del producto y sus tasas de crecimiento.

Los efectos del cambio climático sobre la actividad económica fueron examinados por Jones y Olken (2010). A diferencia de los otros estudios mencionados (Tol y Dell et al.) éste se enfoca en los impactos directos sobre el nivel de exportaciones.

Jones y Olken encuentran que un incremento de 1°C podría reducir el nivel de exportaciones de los países pobres entre 2.0 por ciento y 5.7 por ciento. Mientras que, en los países de mayor desarrollo parece no tener incidencia.

Otro enfoque es el empleado por Schelenker (2006) en su estudio sobre el valor de la tierra agrícola en Estados Unidos. En el que se estiman las ganancias o pérdidas en el valor de la tierra, como consecuencia de variaciones en el clima si toman como referencia los escenarios de cambio climático establecidos por el IPCC.

En general, los resultados para los diversos escenarios muestran que el valor de la tierra podría experimentar desde ligeras ganancias (10 por ciento) hasta pérdidas considerables (-25 por ciento). Uno de sus hallazgos más robustos es que los impactos son heterogéneos entre regiones, la más afectada es la correspondiente a la zona oeste del meridiano 100. Además, el número de condados que se ven afectados superan a aquellos que presentan ganancias.

---

***HALLAZGO DE LA LITERATURA #3*** *Los países de menor desarrollo y los que se ubican en zonas cercanas a los trópicos son los más vulnerables a los impactos del cambio climático.*

---

### **3.4 Impacto del cambio climático por sectores económicos.**

De acuerdo con la literatura, el cambio climático podría tener impactos negativos sobre el crecimiento de los sectores económicos: Agricultura, industria, comercio y los servicios. (Dell et al., 2012; Dell et al., 2014). También muestra que existen impactos sobre otras áreas como son: la salud, la mortalidad y la migración.

***HALLAZGO DE LA LITERATURA #4*** *El cambio climático genera impactos negativos sobre el crecimiento de los diversos sectores productivos: agricultura, pesca, industria, comercio y servicios, entre otros.*

---

### 3.4.1 Agricultura y pesca

El sector agrícola podría verse afectado por los cambios en los patrones de lluvia y precipitación dada su alta dependencia de las condiciones climáticas (Gómez et al., 2011).

De acuerdo con este estudio, uno de los efectos que el cambio climático podría generar es la modificación de la producción y la distribución de los cultivos. Las principales variables climáticas que repercuten directamente sobre el sector agrícola son: variación en la disponibilidad de agua, cambio en la velocidad y frecuencia de vientos, aumento de las horas de calor promedio y ampliación de las zonas áridas.

Los autores estiman dos diferentes modelos de circulación atmosférica, con la finalidad de conocer el impacto del cambio climático sobre la producción agrícola del estado de Jalisco, en México: el modelo *hardly* y el modelo *gfdl*. En ambos, el horizonte temporal es a 2050 y supone un escenario socioeconómico A2<sup>1</sup>. Los resultados de las variables climáticas muestran que en ambos modelos se presenta un incremento en la temperatura media anual.

Sin embargo, los resultados son más drásticos en el modelo *badley* que en el modelo *gfdl*. El primero de estos modelos muestra un cambio en la temperatura promedio de +1.8°C, mientras que el segundo muestra un cambio de +1.3°C. En términos de la precipitación, ésta tiene una caída de 3.3 por ciento en el primer modelo y de 0.6 por ciento en el segundo. Ambos resultados tienen como consecuencia una disminución en las áreas aptas para el cultivo de maíz.

Otro estudio para México (Estrada et al., 2006) examina la relación entre la producción de café y variables tanto económicas como climáticas, con la finalidad de hallar los impactos potenciales del cambio climático. Su estudio se basa en un modelo de regresión múltiple con un enfoque de función de producción.

Los hallazgos muestran que los cambios en la temperatura promedio de las estaciones de verano e invierno, específicamente los aumentos en ésta, tienen los mayores impactos negativos sobre la producción.

Los cambios en las temperaturas y en la precipitación podrían generar una caída de 34 por ciento en la producción del café para el estado de Veracruz en el año 2020; la caída de la producción de café podría tener efectos negativos sobre las condiciones socioeconómicas de la población directamente involucrada en la producción, por ejemplo, los ingresos de esta población disminuirían y, por consiguiente, el cultivo de dicho producto dejaría de ser económicamente viable.

Adicionalmente señalan que las bajas condiciones económicas de los productores son una limitante para la instrumentación de alternativas de adaptación. Cualquier incremento en la temperatura incidiría negativamente sobre la producción de dicho cultivo.

---

<sup>1</sup> Este escenario asume un gran crecimiento poblacional y un lento crecimiento económico.



Los impactos de la variabilidad climática sobre el sector agrícola han sido estudiados para diversas regiones. Giteras (2007) enfoca su análisis en el sector agrícola de la India. El autor encuentra que los impactos por el aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub> podrían ser diferentes, en función del tipo de cultivo (dado que algunos de los cultivos incrementan su tamaño y lo hacen en menos tiempo cuando aumentan los niveles de CO<sub>2</sub>). Sin embargo, existe mayor probabilidad de que los efectos finales del aumento en las temperaturas y de la mayor presencia de sequías sean adversos para el sector agrícola en su totalidad, que resultará en que éste sea más vulnerable.

Otros autores encuentran resultados distintos en cuanto al impacto económico de los cambios ya previstos en el clima (Deschênes y Greenstone, 2007). En su estudio para Estados Unidos, analizan el impacto sobre las ganancias del sector agrícola mediante un modelo de panel a nivel condado y mediante una estimación de efectos fijos.

Los resultados muestran que los efectos en las ganancias de dicho sector son positivos derivado del cambio en la temperatura y en las precipitaciones. Tales ganancias representan un beneficio de 4 por ciento anual en la agricultura.

Por otra parte, el reporte del IPCC (2014) indica que los cambios en el clima generarán efectos negativos sobre la seguridad alimentaria, principalmente en las regiones tropicales y templadas. Por lo cual, de no existir medidas de adaptación, los cultivos como el maíz, el trigo y el arroz se verán impactados de manera negativa. El reporte también indica que a pesar de que podrían existir localidades que de manera individual se vean favorecidas por los cambios en la temperatura, el impacto global será negativo.

Tol (2009) señala que los efectos de corto plazo del cambio climático son positivos en algunos casos, sobre todo en los países lejanos al trópico. No obstante, los efectos de largo plazo son con seguridad negativos.

Los impactos del cambio climático sobre otras actividades primarias, como la pesquera también han sido analizadas. Un artículo de Belhabib et al. (2016) estudia esa relación para la región costera de África, tanto a nivel de pesca artesanal, como de pesca industrial. Los resultados muestran los efectos biológicos presentados a través de la preponderancia de especies de aguas cálidas, al mismo tiempo que los impactos económicos se presentan por el aumento en los costos de la pesca, dado que los trabajadores deben desplazarse a lugares cada vez más lejanos.

***HALLAZGO DE LA LITERATURA #5 El cambio climático tiene impactos negativos sobre el sector primario, donde una de las actividades más afectadas es la agrícola, debido a su alta dependencia de las condiciones climáticas. En el caso de este sector, si bien el cambio climático podría favorecer algunas regiones en particular, el impacto global es negativo.***

---

### 3.4.2 Sector industrial, comercial y de servicios.

Si bien, los impactos del clima son más evidentes sobre las actividades productivas que se realizan a la intemperie, la literatura previa ha encontrado también que los impactos se manifiestan inclusive en las actividades que se llevan a cabo en interiores y bajo circunstancias de clima acondicionado. Tal es el caso de los sectores industrial, los servicios y el comercio. Los hallazgos señalan que estos sectores se ven afectados principalmente por el impacto de las condiciones climáticas sobre la productividad laboral.

Un estudio que relaciona la variación de las temperaturas y de los ciclones con la productividad laboral es el realizado por Hsiang (2010). Se enfoca en el análisis de 28 países de Latinoamérica y el Caribe, emplea un modelo de regresión múltiple. Sus resultados muestran que el producto de la economía reacciona a un aumento de la temperatura de forma muy similar a como lo hace la productividad laboral ante las altas temperaturas. Por lo cual, se sugiere que los modelos económicos de cambio climático deben incorporar a la productividad laboral.

El estudio realizado por Hsiang (2010) también encuentra que un aumento de 1°C generaría pérdidas en el producto anual de los sectores no agrícolas de 2.4 por ciento, las cuales son superiores a las del sector agrícola (-0.1 por ciento del producto económico). Los modelos que se enfocan en los impactos del cambio climático en este sector presentan una subestimación de costos, lo anterior debido a que no contemplan la respuesta de los trabajadores al estrés térmico.

Dell et al. (2012) también estudian el impacto de las variaciones climáticas sobre los diferentes sectores de la economía. En el **sector industrial**, los autores encuentran que un aumento de las temperaturas genera impactos negativos sobre el crecimiento de dicho sector, esta relación surge únicamente en el caso de los países pobres en los que, un aumento de 1°C en la temperatura, tiene como consecuencia una pérdida de 2.04 puntos porcentuales del crecimiento del producto industrial.

Uno de los principales canales mediante los cuales las altas temperaturas impactan a la industria, es la productividad laboral, dado que, en general, son los países pobres quienes tienen un menor acceso a sistemas de aire acondicionado, por lo cual, se encuentran más expuestos a los efectos de las altas temperaturas.

Un estudio más específico es el realizado por Cachon et al. (2012), que analiza los impactos de los eventos extremos del clima sobre el sector de la industria automotriz. El análisis se basa en datos de 64 plantas automotrices de los Estados Unidos, mediante un panel con datos semanales para 10 años.

Los autores buscan conocer si el clima tiene impactos, inclusive, en las actividades que se realizan en interiores y con sistemas de clima acondicionado, tal como la industria de autos. Los resultados muestran que las semanas en donde la temperatura supera los 90°F por seis o siete días, la producción se reduce un 8 por ciento, en promedio. Los resultados encuentran lógico que los aumentos pronosticados en la temperatura y en la mayor incidencia de eventos

extremos, causados por el cambio climático, podrían generar una disminución importante en la producción industrial.

En términos del **sector comercial**, Jones y Olken (2010) examinan las consecuencias que el cambio climático tiene sobre el nivel de exportaciones para un panel de países. Su investigación muestra que el impacto en las exportaciones es mayor al estimado por la literatura previa sobre el PIB global. Así mismo, el análisis de exportaciones es realizado con un mayor nivel de desagregación por sectores económicos.

El análisis muestra que, si bien, los mayores efectos negativos se dan sobre el sector de exportaciones agrícolas, el sector de manufacturas también se ve afectado por los cambios en el clima, en particular el de las manufacturas ligeras. Aunque, no se encontraron impactos sobre la industria de manufacturas pesadas ni sobre la producción de materias primas.

La relación entre las condiciones climáticas y la productividad en el **sector de servicios** también ha sido de relevante interés para la literatura previa (Niemelä et al., 2002; Federspiel et al., 2004). Ambos documentos analizan el efecto de la temperatura sobre la productividad en los trabajadores de dicho sector. El primer estudio muestra una caída de entre 5 por ciento y 7 por ciento en la productividad en un contexto de elevadas temperaturas al interior. Así mismo, el segundo de ellos muestra una menor eficiencia cuando las temperaturas interiores sobrepasaron los 25.4°C.

***HALLAZGO DE LA LITERATURA #6 El cambio climático tiene impactos negativos sobre los sectores: Industrial, comercial y de servicios. El principal canal de transmisión es el efecto en la productividad laboral.***

---

### **3.5 Impacto del cambio climático en otras variables socioeconómicas.**

Por su parte, Deschênes y Moretti (2009) modelan el impacto de los eventos extremos en Estados Unidos sobre el comportamiento de otras variables socioeconómicas: mortalidad y migración. Los autores encuentran que los períodos de olas de calor están relacionados con un aumento en el número de muertes de cada condado, aunque el efecto disminuye en cuanto termina la ola de calor, es decir, el efecto es de corto plazo. Sin embargo, en el caso de las olas de frío, su estudio encuentra que los impactos en la mortalidad de la población son inmediatos pero también persisten durante las semanas siguientes.

En el caso de la movilidad de los individuos, los resultados de Deschênes y Moretti (2009) muestran que existe una mayor probabilidad de que los desplazamientos se realicen hacia los estados que presentan un menor número de días de temperaturas de frío extremo. Así mismo,

los grupos de edad más afectados (adultos mayores y niños) son quienes tienden a realizar dicha movilidad. Los autores mencionan que los resultados son consistentes con el modelo de movilidad racional.

### 3.6 Resumen del estado actual del conocimiento

La relación entre clima y crecimiento económico ha sido estudiada desde diferentes enfoques. Un primer enfoque es el que analiza la incidencia de las características geográficas y climáticas en el crecimiento económico de los países. Con respecto a dicha relación, la literatura previa ha encontrado que los países ubicados en las zonas de los trópicos y cuyas temperaturas son altas, también son, por lo general, más pobres en relación con aquellos países localizados en zonas más alejadas de los trópicos y con temperaturas templadas.

Desde hace décadas, la literatura ha tomado especial interés en el estudio de los impactos económicos del cambio climático. Dicha relación ha sido medida principalmente en términos del impacto en el producto global de las economías. Al respecto, la conclusión más relevante es que el aumento en la temperatura y las modificaciones en los patrones de precipitación, producidos por el cambio climático, tienen efectos negativos sobre el crecimiento económico y bienestar de los países (Gallup et al., 1999; Horowitz, 2009; Sach, 2001).

Además, dicho impacto es diferente en función del nivel de desarrollo de los países (Dell et al., 2012; Tol, 2009; Jones y Olken, 2010). Los hallazgos previos muestran que los países de menor desarrollo y los que se ubican en zonas cercanas a los trópicos son los más vulnerables a los impactos del cambio climático.

Así mismo, los estudios previos han encontrado que el cambio en el clima genera también efectos negativos sobre los diferentes sectores de la economía (Dell et al., 2012; Dell et al., 2014). En este sentido, se han encontrado impactos en los sectores: agrícola, pesquero, industrial, comercial y de servicios.

La agricultura es uno de los sectores más expuestos al cambio climático, ello dada su alta dependencia de las condiciones climáticas (Gómez et al., 2011). En el caso de este sector, algunos estudios apuntan a que el cambio climático podría favorecer algunas regiones en particular (Deschênes y Greenstone, 2007), sin embargo, la mayoría de los estudios coinciden en que el impacto global es negativo (IPCC, 2014; Tol, 2009).

En cuanto al sector de la pesca el impacto es evidente por la migración de las especies hacia otras aguas y por el cambio en la variedad de éstas, lo cual genera mayores costos de desplazamiento para las personas dedicadas a dichas actividades (Belhabib et al., 2016).

En términos de los sectores industrial, comercial y de servicios, la literatura señala que los efectos del cambio climático se transmiten, básicamente, por el impacto sobre la productividad laboral (Hsiang, 2010; Cachon et al., 2012; Niemelä et al., 2002; Federspiel et al., 2004). Lo anterior debido a que, en general, mayores temperaturas tienden a ocasionar estrés térmico en

los trabajadores, aun cuando éstos trabajen en un ambiente con temperatura acondicionada. Así mismo, cambios en la precipitación pueden provocar retrasos e incluso dificultades de acceso a los centros de trabajo, ello tanto para los trabajadores como para los proveedores.

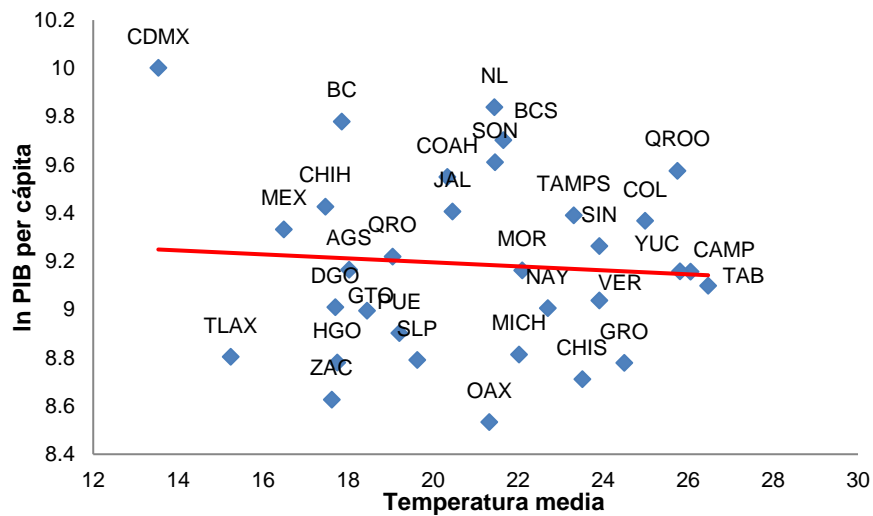
Finalmente, la literatura del tema señala también que existen otras áreas en las cuales el cambio climático tiene incidencia. Entre ellas destacan: la mortalidad, la migración y la salud (Deschênes y Moretti, 2009). De acuerdo con los estudios del tema, el impacto en estas variables genera a su vez costos y, por lo tanto, se transmite al sistema económico.

## 4. Estadística descriptiva

### 4.1 Relación entre el clima y el PIB per cápita de los estados.

La relación entre el ingreso per cápita y la temperatura de largo plazo de los 32 estados es inversa; a mayores temperaturas el ingreso per cápita muestra menores valores. Este resultado se encuentra en el mismo sentido que lo propuesto por algunos estudios previos (Gallup et al., 1999; Horowitz, 2009), los cuales han encontrado que las regiones con climas más calurosos pueden presentar menores niveles de crecimiento económico (Gráfica 1).

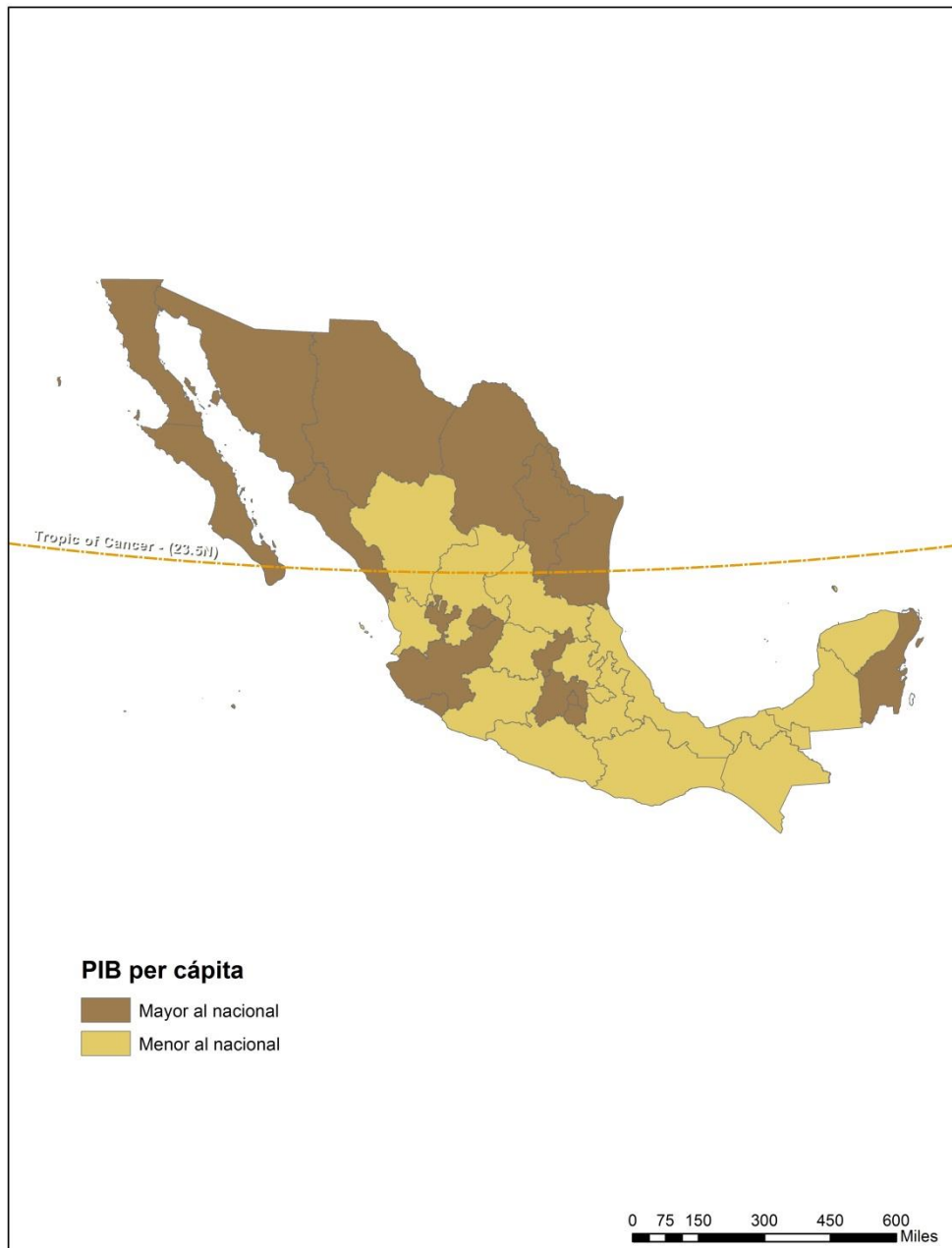
Gráfica 1. Relación histórica entre temperatura y PIB per cápita, 1940-2015.



Fuente: Elaboración propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

El mapa 1 describe el PIB per cápita de los estados. Estos se dividen en dos rangos, los que tienen un ingreso per cápita mayor al promedio nacional y los que su ingreso es menor al nacional. En el mismo mapa es posible ver que el país se encuentra dividido geográficamente por el trópico de cáncer. Al observar dicho mapa es posible notar que los estados ubicados en latitudes mayores al trópico presentan en su mayoría ingresos mayores al promedio nacional, mientras que los estados localizados en el trópico presentan por lo regular un PIB per cápita menor al promedio.

Mapa 1. PIB per cápita por estados.

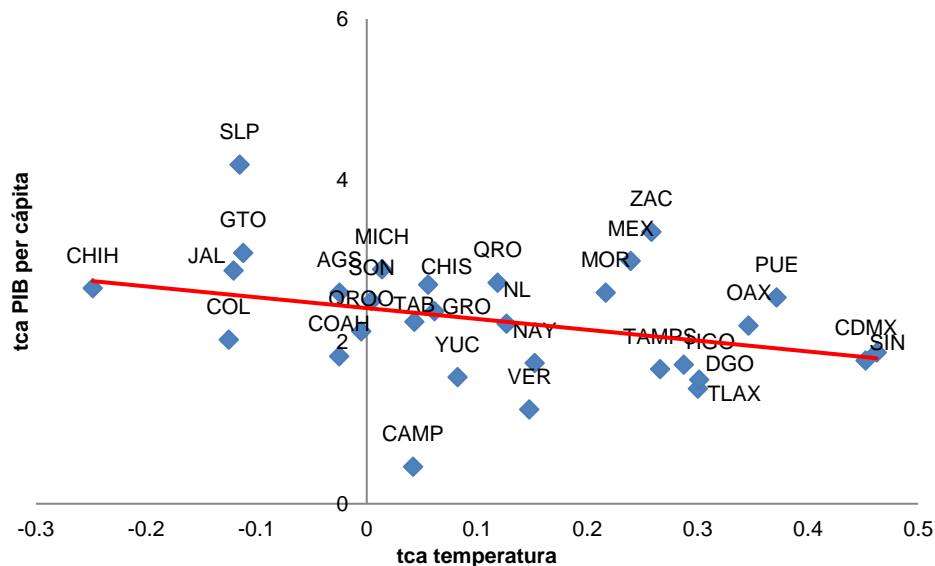


Fuente: Elaboración propia con datos de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

## 4.2 Relación entre el cambio climático y el crecimiento económico de los estados.

La gráfica 2 presenta la relación entre las tasas de crecimiento de largo plazo de la temperatura media y del PIB per cápita para todos los estados. Dicha gráfica muestra que la relación entre estas dos variables es inversa, por lo cual, los estados que presentan tasas altas de crecimiento de la temperatura tienen también las menores tasas de crecimiento del PIB per cápita. Lo cual señala que un mayor aumento de la temperatura media podría acelerar la reducción del ingreso per cápita de los estados.

Gráfica 2. Relación entre la tasa de crecimiento de la temperatura y la tasa de crecimiento del PIB per cápita, 1940-2015.



Fuente: Elaboración propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmosfera, UNAM.

Nota: Los valores para cada estado corresponden a la mediana de la tasa de crecimiento de la temperatura y la mediana de la tasa de crecimiento del PIB, lo anterior debido a la distribución de los datos.



## 5. Metodología

En el análisis de datos de tipo económico, social y ambiental pueden existir diferentes modelos de estimación, lo anterior en función del tipo de datos empleados. En este sentido, pueden existir diferentes dimensiones sobre las cuales se desee estimar relaciones causales entre variables. En el análisis de datos climáticos y económicos se abordan dos tipos de modelos, los cuales serán probados en este documento: series de tiempo y modelos panel. A continuación se especifica la metodología para cada uno de ellos.

### 5.1 Modelos de corrección de error

De acuerdo con Jennings y Gardiner (1999), la metodología de autorregresivos con rezagos distribuidos se puede representar de la siguiente manera:

$$y_t = \alpha_0 + \beta_0 x_t + \alpha_1 y_{t-1} + \beta_1 x_{t-1} + u_t \quad (1)$$

Donde  $y_t$  es la variable endógena y  $x_t$  es la variable exógena. Cabe enfatizar que las variables tanto endógenas como exógenas del modelo comparten el mismo número de rezagos. Específicamente, este modelo considera los valores contemporáneos y los rezagos de las variables explicativas. En dicho modelo,  $u_t$  representa el componente estocástico, el cual tiene un comportamiento normal, independiente e idénticamente distribuido ( $iid \sim N[0, \sigma^2]$ ).

Cuando las series son de orden de integración I(1), el modelo anterior se puede transformar a su forma de modelo corrector de errores (ECM), es decir, un modelo estacionario:

$$\Delta y_t = \alpha_0 - ((1 - \alpha_1)y_{t-1} - (\beta_1 + \beta_0)x_{t-1}) + \beta_0 \Delta x_t + u_t \quad (2)$$

El modelo representado en (2) está conformado por dos partes. El largo plazo, o mejor conocido como el vector de cointegración  $((1 - \alpha_1)y_{t-1} - (\beta_1 + \beta_0)x_{t-1})$ , y el corto plazo que se muestra a través de las diferencias de las variables. Éste sólo se lleva a cabo cuando las series son de orden de integración I(1).

Para la modelación de las series climáticas y económicas se utilizarán modelos autorregresivos con rezagos distribuidos (*ADL*, por sus siglas en inglés), ya que éstos permiten capturar todos los componentes de una serie de tiempo, simultáneamente ofrecen la posibilidad de incorporar la teoría económica en su estructura. Otra de las ventajas de los modelos ADL es que es posible re-expresarlos como un modelo corrector de error (*ECM*, por sus siglas en inglés) cuando la serie a modelar presente evidencia de raíz unitaria (la serie no es estacionaria). Así mismo, si se desea realizar ejercicios de simulación de política es recomendable emplear un

modelo de ecuaciones simultáneas en lugar de un SVAR, debido a que el segundo es más útil para analizar la dinámica del modelo ante un shock.

Particularmente, este estudio empleará un sistema de ecuaciones simultáneas cointegrado, dado que de esta manera es posible realizar distintos ejercicios de simulación de políticas económicas y ambientales. De acuerdo con Enders (2003) es preferible iniciar con un modelo ADL, el cual puede ser reparametrizado como un modelo ECM o VAR cointegrado, tal como se expresa a continuación:

$$\Delta Z_t = \Gamma \Delta Z_{t-1} + \Pi \Delta Z_{t-1} + \mu + \varepsilon_{zt} \quad (3)$$

Donde  $\Delta Z_t$  representa las diferencias de las variables del sistema,  $Z_{t-1}$  son las variables del sistema en niveles, es decir, las relaciones de largo plazo y  $\varepsilon_{zt}$  son los errores del modelo. Si  $Z_t$  es de orden de integración 1,  $Z_t \sim I(1)$ , implica que  $\Delta Z_t \sim I(0)$  es estacionaria.

Lo anterior señala que no puede tener un rango igual al de variables del sistema porque el de variables endógenas no puede ser igual al de variables estacionarias, de modo que  $\alpha = 0$  ó puede reducirse al rango  $\alpha = \alpha \beta$ . Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son matrices de dimensión  $p \times r$ ,  $r \leq p$ . Bajo la hipótesis de no estacionariedad,  $I(1)$ , el modelo VAR cointegrado queda representado por:

$$\Delta Z_t = \Gamma \Delta Z_{t-1} + \dots + \Pi_{k-1} \Delta Z_{t-k+1} + \alpha \beta Z_{t-1} + \mu + \varepsilon_t \quad (4)$$

Una de las ventajas de los modelos con diseño ECM es que permiten hacer inferencia de las series en el corto y largo plazo, lo anterior dado que es posible incluir variables en niveles y en diferencias en el mismo modelo.

Antes de iniciar con la estimación de las ecuaciones o modelos, debe darse un pretratamiento a las series de tiempo, a partir de dicho tratamiento será posible identificar los componentes de las series, así como seleccionar el número de rezagos apropiados mediante la prueba de correlación serial. Otra cuestión importante es verificar que las series sean estacionarias.

Una vez realizado el proceso de depuración y caracterización de las series se procederá a su modelación. En esta etapa se ejecutarán las pruebas de correcta especificación, estas pruebas comprenden: la prueba de normalidad, no autocorrelación, homocedasticidad, estabilidad, entre otras. Así mismo, se realizarán las pruebas dentro y fuera de la muestra para evaluar la bondad de ajuste del modelo. Esta metodología requiere el uso del software estadístico Eviews.

## 5.2 Modelo panel

Los modelos econométricos de datos panel incluyen una muestra de individuos de interés a través del tiempo. Es decir, combinan dos tipos de datos: datos de corte transversal (individuos en un momento determinado) y datos de series de tiempo. El principal objetivo de los modelos de panel es capturar la heterogeneidad no observable tanto entre los individuos como en el tiempo (efectos individuales y temporales), los cuales no pueden ser detectados cuando se emplean datos de corte transversal o de series de tiempo (Mayorga y Muñoz, 2000).

Los efectos individuales hacen referencia a aquellos que impactan de manera diferente a cada individuo pero que no cambien en el tiempo, ejemplo de ello son: el acceso a la tecnología, la capacidad empresarial, etc. Por su parte, los efectos temporales son los shocks que afectan a todos los individuos por igual pero cambian a través del tiempo, por ejemplo: un cambio en la tasa de interés de referencia del banco central, una depreciación del tipo de cambio, etc.

La ecuación 5 presenta la especificación general del modelo de regresión con datos panel:

$$Y_{it} = \alpha_{it} + \beta X_{it} + u_{it} \quad (5)$$

Con  $i = 1 \dots N$  y  $t = 1 \dots T$

Donde  $i$  indica la unidad de interés o individuo,  $t$  hace referencia al tiempo,  $\alpha$  es un vector de intercepto de  $N$  parámetros,  $\beta$  es el vector de  $K$  parámetros y  $X_{it}$  es la  $i$ -ésima observación al momento  $t$  para las  $K$  variables explicativas. En este caso, la muestra tiene un tamaño total de  $N \times T$ . El término de error ( $u_{it}$ ) puede descomponerse como sigue:

$$u_{it} = u_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

Donde  $u_i$  son los efectos individuales,  $\delta_t$  son los efectos temporales y  $\varepsilon_{it}$  es el término de error puramente aleatorio. Dependiendo de los supuestos que se hagan sobre  $u_i$  se pueden presentar tres posibilidades:

1.- Si  $u_i = 0$ , entonces se supone que no hay heterogeneidad no observable, ni entre los individuos ni en el tiempo, por lo que es mejor estimar el modelo con el método de estimación de mínimos cuadrados ordinarios.

2.- Si  $u_i \neq 0$ , entonces se considera que hay efectos fijos entre los individuos, por lo que la heterogeneidad no observable se presentará en la constante del modelo.

3.- Si  $\mu_i | X_i \sim N(0, \sigma_\mu^2)$ , entonces se considera a  $u_i$  como una variable aleatoria no observable que varía únicamente entre los individuos, pero no en el tiempo (efectos aleatorios).

A continuación se analiza más detalladamente cada una de estas especificaciones.

### 5.2.1 Modelo de efectos fijos

El supuesto más elemental y consistente sobre el comportamiento de los residuos es el de Efectos Fijos. El modelo de efectos fijos (FE, por sus siglas en inglés) supone que cada individuo del panel tiene un intercepto diferente e independiente, dadas sus características propias. La forma de capturar a los  $N$  interceptos es con el uso de una variable *dummy*. La ecuación del modelo FE está dado por

$$Y_{it} = i \alpha_i + \beta X_i + U_{it} \quad (7)$$

Con  $u_{it} = u_i + \varepsilon_{it}$

Es decir, el error  $u_{it}$  puede descomponerse en dos partes, una fija y constante para cada individuo ( $u_i$ ), y una aleatoria que cumple los requisitos de MCO ( $\varepsilon_{it}$ ).

### 5.2.2 Modelo de efectos aleatorios

Cuando el término de error esté correlacionado con los regresores, el modelo de Efectos Fijos no es el más adecuado para realizar inferencias. En este caso es preferible emplear el modelo de efectos aleatorios para capturar dicha correlación (ver prueba de Hausman). El modelo de efectos aleatorios considera que  $\mu_i$  es una variable aleatoria con un valor medio  $\mu_i$  y una varianza  $(\mu_i) \neq 0$ . La ecuación que representa los efectos aleatorios es la siguiente:

$$Y_{it} = (\alpha + \mu_i) + \beta' X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

En esta ecuación  $\mu_i$  indica la perturbación aleatoria, lo cual significa que no se está seguro del valor exacto en el origen para cada individuo, sino que se supone que dicho valor se encontrará en torno a una media. Para fines prácticos,  $\mu_i$  se agrupará con  $\varepsilon_{it}$ , por lo cual la ecuación 8 puede re-expresarse como sigue:

$$Y_{it} = \alpha + \beta' X_{it} + U_{it} \quad (9)$$

Con  $U_{it} = \delta_t + \mu_i + \varepsilon_{it}$

Donde  $U_{it}$  es el nuevo término de error compuesto, en el cual se considera a  $\delta_t$  como el error asociado al tiempo,  $\mu_i$  el error entre individuos y  $\varepsilon_{it}$  el efecto de ambas. Para resolver el modelo de efectos aleatorios es recomendable emplear el método de mínimos cuadrados generalizados (MCG), dado que los errores están correlacionados con los regresores.

### 5.2.3 Consideraciones para la selección del modelo de panel

La selección del mejor modelo para datos panel puede expresarse en tres pasos: 1) se parte de un modelo que no considera la existencia de heterogeneidad no observada, “modelo *pool*”; 2) mediante una prueba F se contrasta el modelo *pool* con un modelo donde hay heterogeneidad no observada en los individuos y en el tiempo. Con base en esta prueba, si no es posible rechazar la hipótesis nula, entonces se estimará un modelo de efectos fijos; 3) se aplica la prueba de Hausman para verificar si es mejor el modelo de efectos fijos o el de efectos aleatorios.

Finalmente, estimar un modelo de panel supone la existencia de características no observables constantes en el tiempo que podrían estar afectando la precisión de las estimaciones de los impactos. Es por ello que se aprovecha la disponibilidad de una base de datos de panel que pueda contemplar este tipo de heterogeneidad.

## 6. Estimación econométrica

En este capítulo se presentan los resultados del impacto de la variación en la precipitación y en la temperatura, producto del cambio climático, sobre el crecimiento del PIB per cápita a nivel estatal y nacional. El estudio se realizó mediante dos tipos de estimaciones econométricas. En primer lugar, se realizaron modelos de series de tiempo, con base en esta metodología también es posible realizar ejercicios de simulación, que permiten conocer qué pasaría en el año 2100 bajo diferentes contextos de patrones de temperatura y precipitación. Así mismo, se realiza un análisis con base en la metodología de datos panel.

En este último análisis se corrobora la robustez de las estimaciones de series de tiempo, y se verifica la existencia de heterogeneidad entre los estados. De acuerdo con ambas metodologías, el cambio en las variables climáticas podría afectar de manera importante el crecimiento per cápita de México.

### 6.1 Estimaciones con base en modelos de series de tiempo

La estimación con base en modelos de series de tiempo se divide en dos secciones: estudio de impactos y simulación de escenarios. La primera de estas secciones analiza la respuesta del crecimiento del producto per cápita ante cambios en las variables climáticas de temperatura y precipitación por medio de elasticidades para el período 1940-2013.

Por su parte, el segundo apartado presenta un análisis de la simulación del PIB per cápita de acuerdo con ocho escenarios de precipitación y de temperatura para el año 2100. Este tipo de simulaciones puede realizarse cuando se cuenta con información anticipada de contextos que podrían presentarse en el largo plazo.

En este caso, dicha información es obtenida a partir de los RCP, los cuales son modelos que contemplan diferentes patrones de crecimiento económico, poblacional y tecnológico, así como distintas situaciones de adaptación al cambio climático. Los escenarios mencionados se subdividen en dos tipos: escenarios donde las emisiones son bajas y escenarios con emisiones altas. Los escenarios de emisiones bajas son consistentes con un aumento de temperatura global de más o menos 2°C, donde el contexto es de una gran cooperación internacional para reducir emisiones de gases de efecto invernadero.

Por su parte, los escenarios de emisiones altas contemplan un aumento de la temperatura global de aproximadamente 4.5°C, donde, en general, los combustibles fósiles predominan como energéticos principales.

### **6.1.1 Impacto del cambio en la temperatura y en la precipitación sobre el crecimiento del PIB per cápita.**

Esta sección evalúa el impacto que el cambio en variables climáticas podría generar sobre el crecimiento del PIB per cápita. El análisis se realiza en dos apartados, el primer apartado presenta los resultados para cada uno de los estados, mientras que en el segundo apartado aparecen los resultados en términos agregados para el país. Las variables de clima que se analizan en este estudio son: temperatura media y precipitación. A grandes rasgos, los cambios en la precipitación y en la temperatura mostraron impactos negativos sobre el crecimiento en términos per cápita. Dichos resultados fueron observados tanto en el análisis estatal como en el nacional.

#### **6.1.1.1 Impactos a nivel estatal**

Los resultados de los modelos econométricos con relación al efecto que tiene la variación de la temperatura media y de la precipitación, sobre el crecimiento del PIB per cápita, para las 32 entidades federativas, indican que un aumento de 1°C en la temperatura, tendría un efecto negativo sobre el crecimiento del PIB per cápita.

Entre los estados, el mayor impacto adverso podría observarse en Baja California Norte (-7.52 por ciento). Hidalgo podría también verse afectado de manera importante por la variación en la temperatura (-6.84 por ciento).

Contrariamente las entidades federativas donde los efectos podrían ser menos adversos son Sinaloa y Puebla, en éstos el aumento de 1°C tendría como consecuencia una caída del PIB per cápita de -0.33 por ciento y -0.37 por ciento en cada caso. Resulta importante señalar que en todos los estados el cambio en la temperatura media repercute de manera negativa sobre el PIB per cápita (Tabla 1).

En términos de la precipitación, se observó que el incremento de 1 mm anual representa un impacto negativo sobre el crecimiento del PIB per cápita. El cambio en esta variable climática afecta en mayor medida a los estados de Coahuila y Sonora (-0.27 por ciento y -0.23 por ciento, respectivamente). Mientras que, en los estados de Guanajuato y Nuevo León el impacto del aumento en 1mm en precipitación anual es nulo.

Tabla 1. Impacto de variaciones en la temperatura y la precipitación estatal en el crecimiento del PIB per cápita

Estado	Impacto en el PIB per cápita ante el aumento de 1°C en la temperatura promedio	Impacto en el PIB per cápita ante el aumento de 1 mm en la precipitación anual
Aguascalientes	-5.52	-0.05
Baja California Norte	-7.52	-0.02
Baja California Sur	-3.00	-0.15
Campeche	-1.96	-0.01
Coahuila	-4.29	-0.27
Colima	-1.33	-0.01
Chiapas	-3.60	-0.03
Chihuahua	-0.74	-0.15
Ciudad de México	-1.89	-0.02
Durango	-1.06	-0.07
Guanajuato	-3.69	0.00
Guerrero	-5.14	-0.06
Hidalgo	-6.84	-0.05
Jalisco	-2.07	-0.01
México	-2.48	-0.04
Michoacán	-3.69	-0.01
Morelos	-5.30	-0.02
Nayarit	-1.52	-0.05
Nuevo León	-1.72	0.00
Oaxaca	-1.95	-0.09
Puebla	-0.37	-0.05
Querétaro	-4.81	-0.01
Quintana Roo	-0.70	-0.01
San Luis Potosí	-2.60	-0.15
Sinaloa	-0.33	-0.01
Sonora	-3.60	-0.23
Tabasco	-2.83	-0.04
Tamaulipas	-2.28	-0.06
Tlaxcala	-1.59	-0.03
Veracruz	-1.38	-0.03
Yucatán	-1.94	-0.02
Zacatecas	-1.92	-0.04

Fuente: Estimación propia con datos de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

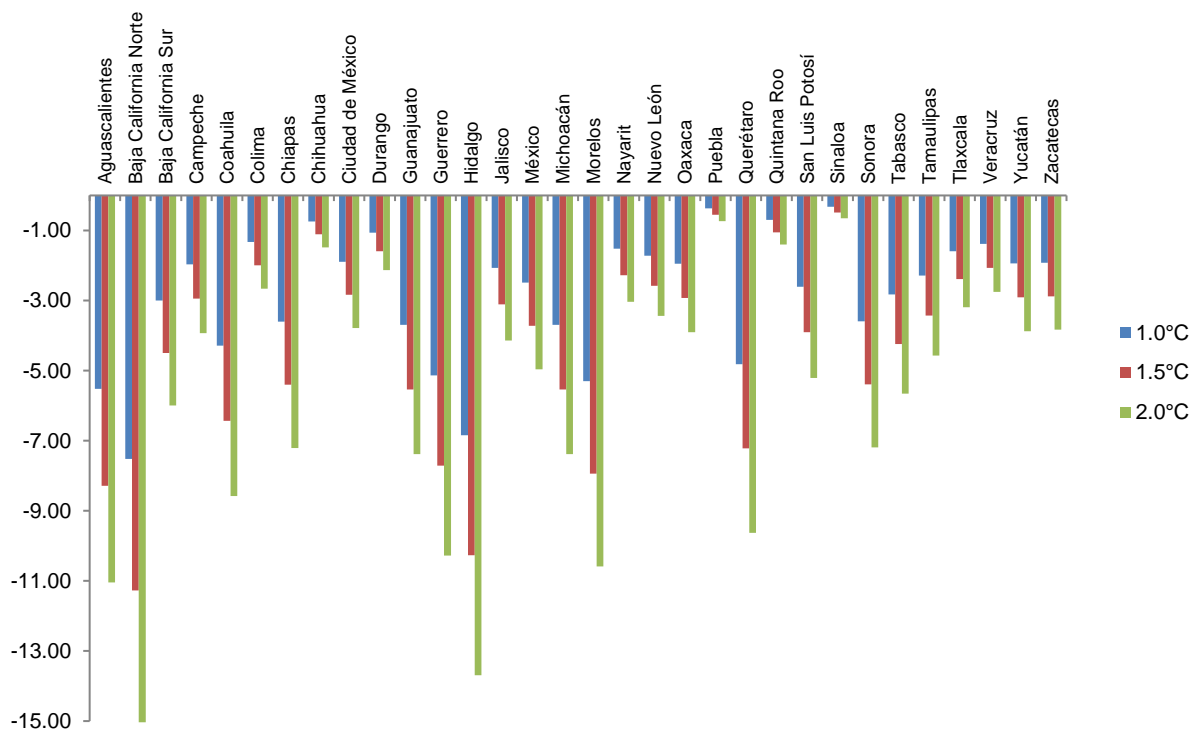
Los impactos que el cambio en la temperatura tendrían sobre el PIB per cápita de cada estado muestran que: Si el aumento es 1°C, la temperatura promedio generaría una reducción del PIB per cápita estatal de entre -0.33 por ciento y -7.52 por ciento.

El aumento de 1.5°C tendría un impacto de entre -0.49 por ciento y -11.28 por ciento del PIB per cápita.

Si el aumento de la temperatura es de 2°C el producto per cápita estatal podría reducir entre -0.65 por ciento y -15.03 por ciento.

Es posible apreciar que existe heterogeneidad de los impactos, de manera que el estado más vulnerable es Baja California Norte y el que presenta menos afectaciones en el crecimiento de su PIB per cápita ante cambios en la temperatura es Sinaloa (Gráfica 3).

Gráfica 3. Impacto del cambio en la temperatura en 1.0°C, 1.5°C y 2°C sobre la tasa de crecimiento del PIB per cápita estatal.



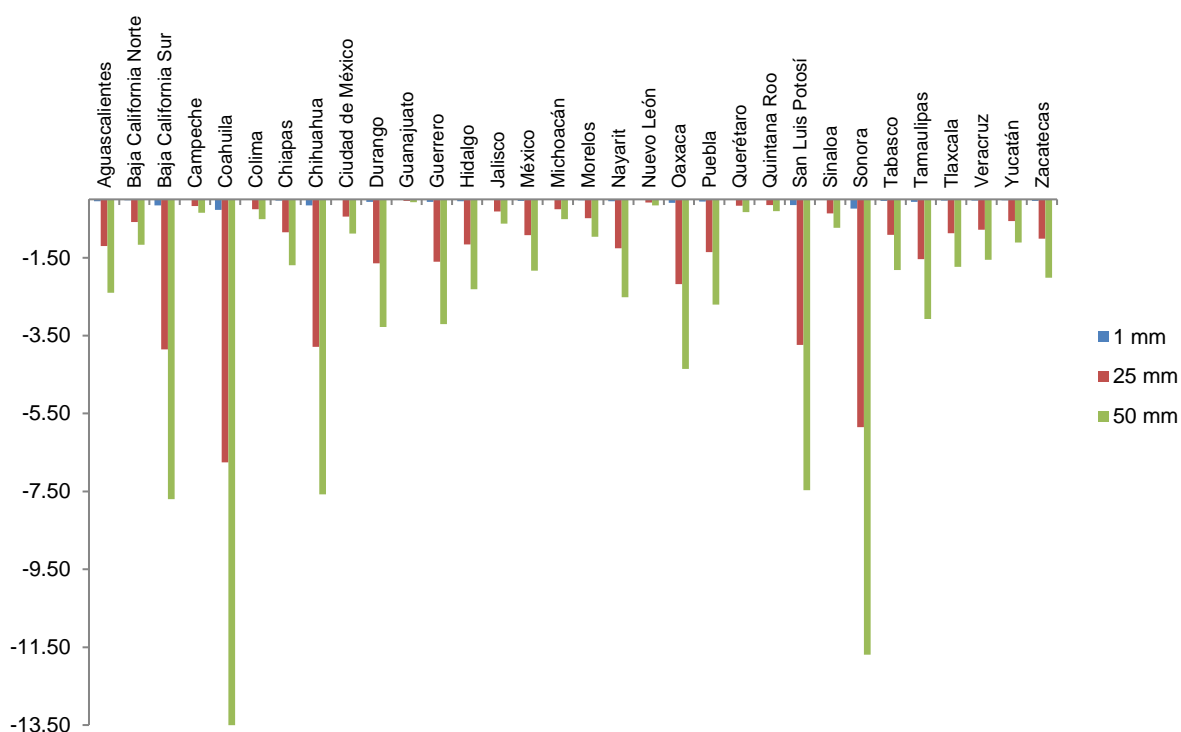
Fuente: Elaboración propia con datos de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

En relación con el impacto del cambio en la precipitación sobre el crecimiento del PIB per cápita en las entidades federativas, el aumento en 1 mm podría generar reducciones del crecimiento del PIB per cápita de hasta -0.27 por ciento. Un aumento en 25 mm tendría una repercusión de hasta -6.75 por ciento. Mientras que, un incremento en la precipitación de 50 mm reduciría el PIB per cápita en hasta -13.5 por ciento.



El cambio en esta variable afectaría con mayor magnitud a los estados de Coahuila y Sonora. Contrariamente los estados de Guanajuato y Nuevo León podrían sufrir impactos muy pequeños en su PIB per cápita. Estos datos indican también que existe heterogeneidad en el impacto del nivel de precipitación en los diferentes estados (Gráfica 4).

Gráfica 4. Impacto del cambio en la precipitación en 1 mm, 25 mm y 50 mm sobre el PIB per cápita estatal.



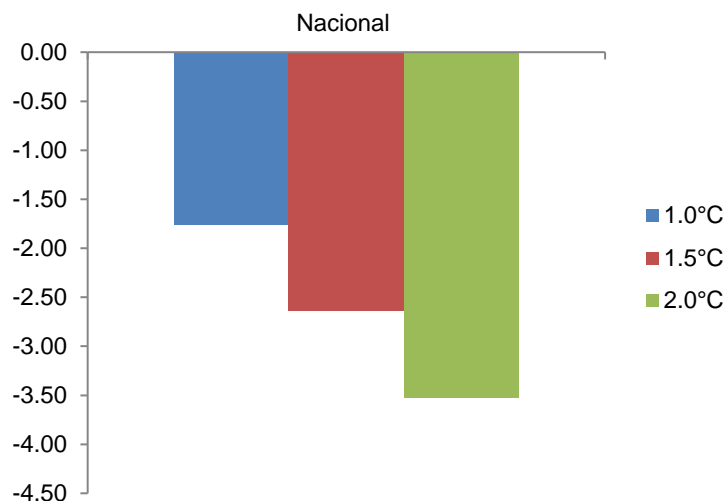
Fuente: Elaboración propia con datos de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

### 6.1.1.2 Impacto a nivel nacional.

A continuación se discuten los impactos del cambio en la temperatura media y en la precipitación sobre el PIB per cápita de México. En general, el cambio de estas dos variables climáticas podría tener importantes efectos negativos sobre el PIB per cápita. De manera particular se analiza el impacto que tendría el aumento de 1°C, 1.5°C y 2.0°C.

Un aumento de la temperatura promedio de 1.0°C impactaría de manera negativa el crecimiento del PIB per cápita en -1.76 por ciento. Con un aumento de la temperatura de 1.5°C, el crecimiento se vería afectado en -2.64 por ciento. En el caso en el que la temperatura aumentara 2.0°C, el PIB nacional reduciría su crecimiento en -3.52 por ciento (Gráfica 5).

Gráfica 5. Impacto del cambio en la temperatura en 1.0°C, 1.5°C y 2°C sobre la tasa de crecimiento del PIB per cápita nacional.

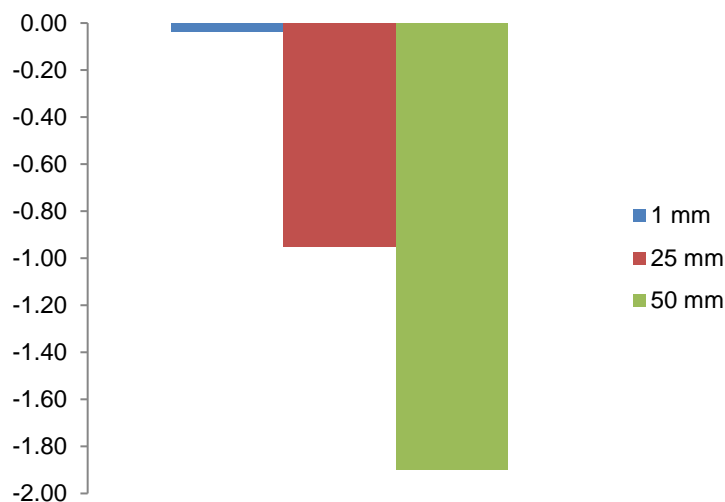


Fuente: Estimación propia con datos de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

En la gráfica 6 se aprecian los efectos del cambio en la precipitación en México fueron evaluados para tres distintos niveles de cambio en dicha variable: 1 mm, 25 mm y 50 mm. En general, los datos a nivel nacional señalan que el cambio en las variables climáticas podría reducir de manera importante el crecimiento económico del país.

El aumento de 1 mm en los niveles de precipitación nacional tiene un efecto muy pequeño sobre el crecimiento del PIB per cápita (-0.04 por ciento). Sin embargo, un aumento de la precipitación de 25 mm podría generar una reducción de 0.95 por ciento del crecimiento per cápita. Mientras que un aumento en la precipitación en 50 mm podría propiciar una caída de 1.90 por ciento del PIB per cápita (Gráfica 6).

Gráfica 6. Impacto del cambio en la precipitación en 1 mm, 25 mm y 50 mm sobre el PIB per cápita nacional.



Fuente: Estimación propia con datos de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

### 6.1.2 Escenarios de crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con diferentes contextos de precipitación y temperatura, 2014-2100

En este apartado se presentan los resultados de los escenarios de crecimiento económico para el año 2100. Dichos resultados consisten en las diferencias de medias del PIB per cápita durante el período histórico (1941-2013) y durante el período simulado (2014-2100), en donde esta diferencia es atribuible al cambio en las variables climáticas.

Los escenarios están basados en las proyecciones de precipitación y de temperatura de los modelos RCP del IPCC. Dichas proyecciones de cambio climático contemplan ocho diferentes contextos, donde cuatro de ellos son de emisiones bajas de CO<sub>2</sub>, mientras que los otros cuatro se refieren a emisiones altas.

De acuerdo con nuestros escenarios de crecimiento económico, los cambios en las variables climáticas que se proyectan para finales del siglo XXI tendrían como consecuencia una caída en el PIB per cápita de todos los estados de la república. Esta reducción en el PIB per cápita surge tanto en los escenarios de bajas emisiones como en las de altas emisiones.

### 6.1.1.1 Escenarios a nivel estatal

En este apartado se estimaron escenarios de crecimiento del PIB per cápita para cada una de las proyecciones de temperatura y de precipitación de los RCP al año 2100. A partir de nuestros escenarios se calculó el cambio en la tasa media de crecimiento del PIB per cápita en el período 2014-2100 con relación al período histórico (1941-2013).

La variación en la temperatura que se proyecta en los ocho modelos de referencia traería como consecuencia una reducción de la tasa media de crecimiento del PIB per cápita de todos los estados. Otro hallazgo importante es que en 30 de los 32 estados analizados, los escenarios con emisiones de CO<sub>2</sub> altas tendrían como consecuencia mayores caídas del crecimiento económico en comparación con los contextos de emisiones bajas (Tabla 2).

Este resultado podría indicar que las políticas de reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> podrían beneficiar también el crecimiento del producto per cápita de los estados.

Entre los estados analizados, Baja California Sur es el estado que presenta la mayor reducción en su PIB per cápita, esta caída es de entre 5.63 por ciento y 5.68 por ciento en contextos de emisiones bajas y de entre 5.93 por ciento y 6.15 por ciento en contextos de emisiones altas. Otro estado que podría ser afectado de manera importante es Zacatecas, dicho estado muestra una reducción en su crecimiento de entre 3.07 y 3.08 por ciento con emisiones bajas y de entre 3.13 y 3.16 por ciento con emisiones altas.

Por otro lado, Baja California Norte y Durango son los estados en los cuales las reducciones de su PIB per cápita son menores. El primero de dichos estados muestra una reducción en su crecimiento per cápita de entre 0.33 y 0.34 por ciento en emisiones bajas y de entre 0.50 y 0.65 por ciento en emisiones altas. Mientras que, el último de estos estados podría tener reducciones de entre 0.61 y 0.62 por ciento en contextos de emisiones bajas y de entre 0.64 y 0.67 por ciento en contextos de emisiones altas.

Tabla 2. Escenarios de impacto en la tasa media de crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con diferentes proyecciones de temperatura por estados.

Estado	Emisiones bajas				Emisiones altas			
	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPI-ESM-MR	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPI-ESM-MR
Aguascalientes	-2.22	-2.22	-2.11	-2.13	-1.59	-1.41	-1.19	-1.28
Baja California Norte	-0.34	-0.33	-0.34	-0.34	-0.50	-0.61	-0.65	-0.51
Baja California Sur	-5.68	-5.68	-5.65	-5.63	-5.95	-6.04	-6.15	-5.93
Campeche	-2.92	-2.92	-2.93	-2.92	-2.96	-3.00	-3.01	-3.01
Ciudad de México	-1.44	-1.44	-1.44	-1.44	-1.48	-1.49	-1.49	-1.50
Chiapas	-2.00	-2.03	-2.03	-2.01	-2.09	-2.16	-2.16	-2.16
Chihuahua	-1.65	-1.66	-1.65	-1.65	-1.68	-1.69	-1.70	-1.69
Coahuila	-2.07	-2.10	-2.08	-2.08	-2.15	-2.20	-2.22	-2.19
Colima	-1.56	-1.59	-1.58	-1.57	-1.67	-1.68	-1.70	-1.69
Durango	-0.61	-0.62	-0.62	-0.62	-0.64	-0.66	-0.67	-0.66
Estado de México	-2.88	-2.89	-2.90	-2.88	-2.97	-3.01	-3.02	-3.02
Guanajuato	-2.63	-2.63	-2.64	-2.64	-2.74	-2.79	-2.84	-2.79
Guerrero	-2.54	-2.55	-2.56	-2.55	-2.67	-2.73	-2.76	-2.75
Hidalgo	-2.64	-2.66	-2.68	-2.65	-2.81	-2.93	-2.95	-2.95
Jalisco	-2.67	-2.67	-2.68	-2.67	-3.07	-3.18	-3.21	-3.20
Michoacán	-2.59	-2.59	-2.61	-2.60	-2.68	-2.71	-2.74	-2.73
Morelos	-1.66	-1.73	-1.71	-1.67	-1.86	-1.93	-1.94	-1.94
Nayarit	-1.97	-1.97	-1.97	-1.97	-1.49	-1.56	-1.58	-1.57
Nuevo León	-2.49	-2.51	-2.51	-2.50	-2.55	-2.58	-2.59	-2.57
Oaxaca	-2.89	-2.90	-2.90	-2.89	-2.94	-2.96	-2.96	-2.95
Puebla	-2.23	-2.23	-2.23	-2.23	-2.24	-2.24	-2.24	-2.24
Querétaro	-2.52	-2.52	-2.52	-2.52	-2.54	-2.54	-2.55	-2.54
Quintana Roo	-2.00	-2.01	-2.02	-2.01	-2.08	-2.11	-2.14	-2.12
San Luis Potosí	-1.99	-2.01	-2.01	-1.99	-2.08	-2.11	-2.13	-2.12
Sinaloa	-1.62	-1.62	-1.62	-1.61	-1.63	-1.65	-1.66	-1.65
Sonora	-2.53	-2.55	-2.56	-2.53	-2.67	-2.71	-2.75	-2.69
Tabasco	-2.46	-2.48	-2.48	-2.47	-2.53	-2.59	-2.59	-2.59
Tamaulipas	-1.16	-1.23	-1.20	-1.17	-1.36	-1.45	-1.47	-1.41
Tlaxcala	-1.96	-2.02	-1.99	-1.97	-2.01	-2.06	-2.06	-2.06
Veracruz	-1.11	-1.12	-1.12	-1.11	-1.15	-1.17	-1.18	-1.17
Yucatán	-1.50	-1.50	-1.51	-1.50	-1.54	-1.55	-1.56	-1.56
Zacatecas	-3.07	-3.08	-3.08	-3.08	-3.13	-3.15	-3.18	-3.16

Fuente: Elaboración propia con datos de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Por su parte, los escenarios de crecimiento del PIB per cápita, basados en las proyecciones de cambios en la precipitación, sugieren que el crecimiento promedio del PIB per cápita de todos los estados reduciría hacia el año 2100, producto del cambio en la precipitación durante este siglo (Tabla 3).

Baja California Sur es nuevamente el estado más afectado por los cambios en la precipitación. En este estado, la tasa de crecimiento del PIB per cápita se reduciría entre -5.52 y -5.67 por ciento.

Campeche podría tener también fuertes reducciones en su tasa media de crecimiento del PIB per cápita, la caída en este estado podría ser de entre -2.85 y -3.11 por ciento.

Por el contrario, los estados menos afectados por los cambios en los patrones de lluvia son Baja California Norte y Ciudad de México. En estos dos estados las reducciones en el crecimiento per cápita van de -0.28 a -0.32 por ciento y de -0.31 a -0.74 por ciento, respectivamente.

Aunque los impactos sean bajos en proporción al crecimiento del PIB per cápita, su nivel también dependerá del tamaño de la economía. En el caso de los escenarios que relacionan el cambio en la precipitación y el crecimiento económico, las diferencias entre emisiones bajas y emisiones altas parecen ser pequeñas, sin embargo, este resultado debe ser estudiado de manera más desagregada para comprender en mayor medida este fenómeno.

Tabla 3. Escenarios de impacto en la tasa media de crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con diferentes proyecciones de precipitación.

Estado	Emisiones bajas				Emisiones altas			
	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPI-ESM-MR	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPI-ESM-MR
<i>Aguascalientes</i>	-2.30	-2.30	-2.26	-2.24	-2.20	-2.16	-2.11	-1.80
<i>Baja California Norte</i>	-0.32	-0.32	-0.31	-0.31	-0.28	-0.31	-0.29	-0.30
<i>Baja California Sur</i>	-5.62	-5.54	-5.60	-5.56	-5.62	-5.60	-5.67	-5.52
<i>Campeche</i>	-3.11	-3.06	-3.07	-3.08	-3.11	-3.01	-2.99	-2.85
<i>Ciudad de México</i>	-0.74	-0.77	-0.71	-0.74	-0.74	-0.76	-0.61	-0.31
<i>Chiapas</i>	-2.05	-1.95	-1.98	-2.03	-2.06	-1.80	-1.55	-0.36
<i>Chihuahua</i>	-2.25	-2.17	-2.10	-2.20	-2.15	-2.14	-1.77	-1.67
<i>Coahuila</i>	-2.06	-2.08	-2.10	-2.06	-2.07	-2.11	-1.87	-1.80
<i>Colima</i>	-1.56	-1.58	-1.59	-1.56	-1.62	-1.60	-1.53	-1.40
<i>Durango</i>	-1.66	-1.67	-1.65	-1.65	-1.68	-1.63	-1.41	-1.18
<i>Estado de México</i>	-2.74	-2.79	-2.68	-2.73	-2.76	-2.77	-2.53	-1.98
<i>Guanajuato</i>	-2.66	-2.66	-2.66	-2.66	-2.66	-2.66	-2.65	-2.65
<i>Guerrero</i>	-2.22	-2.24	-2.11	-2.25	-2.25	-2.16	-1.89	-1.17
<i>Hidalgo</i>	-2.46	-2.66	-2.33	-2.57	-2.56	-2.59	-2.01	-1.52
<i>Jalisco</i>	-2.66	-2.65	-2.64	-2.64	-2.82	-2.85	-2.27	-1.78
<i>Michoacán</i>	-1.80	-1.80	-1.78	-1.80	-1.80	-1.79	-1.76	-1.68
<i>Morelos</i>	-1.96	-1.99	-1.93	-1.96	-1.96	-1.97	-1.90	-1.71
<i>Nayarit</i>	-1.80	-1.79	-1.72	-1.74	-1.59	-1.60	-1.53	-1.35
<i>Nuevo León</i>	-2.49	-2.48	-2.48	-2.48	-2.48	-2.48	-2.48	-2.47
<i>Oaxaca</i>	-2.76	-2.84	-2.64	-2.89	-2.77	-2.64	-2.24	-0.57
<i>Puebla</i>	-2.93	-2.99	-2.85	-2.95	-2.96	-2.96	-2.60	-2.02
<i>Querétaro</i>	-2.53	-2.53	-2.52	-2.53	-2.53	-2.50	-2.46	-2.37
<i>Quintana Roo</i>	-2.35	-2.37	-2.35	-2.35	-2.37	-2.36	-2.35	-2.32
<i>San Luis Potosí</i>	-2.94	-3.00	-2.85	-2.82	-2.91	-3.02	-2.55	-1.71
<i>Sinaloa</i>	-1.69	-1.68	-1.63	-1.64	-1.64	-1.66	-1.54	-1.49
<i>Sonora</i>	-2.66	-2.55	-2.27	-2.64	-2.43	-2.33	-1.80	-2.16
<i>Tabasco</i>	-2.54	-2.41	-2.35	-2.51	-2.59	-2.25	-1.84	-0.31
<i>Tamaulipas</i>	-1.33	-1.33	-1.30	-1.29	-1.27	-1.32	-1.20	-0.93
<i>Tlaxcala</i>	-2.25	-2.28	-2.21	-2.26	-2.24	-2.27	-2.03	-1.76
<i>Veracruz</i>	-1.56	-1.59	-1.47	-1.59	-1.56	-1.53	-1.17	-0.43
<i>Yucatán</i>	-1.51	-1.48	-1.42	-1.46	-1.51	-1.39	-1.30	-1.03
<i>Zacatecas</i>	-3.07	-3.06	-3.04	-3.05	-2.67	-2.64	-2.56	-2.43

Fuente: Elaboración propia con datos de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

### 6.1.1.2 Escenarios a nivel nacional.

La diferencia en el crecimiento promedio del PIB per cápita a nivel nacional, durante el periodo de simulación (2014-2100) en comparación con el período observado (1940-2013), indican que el crecimiento del producto per cápita podría verse reducido como producto del cambio en la temperatura durante el siglo XXI.

El impacto sería mayor en contextos de altas emisiones de CO<sub>2</sub>. Dicha reducción podría ser de entre -1.96 y -1.97 por ciento en escenarios de emisiones bajas, y de entre -2.01 y -2.03 por ciento en escenarios de emisiones altas (Tabla 4).

Tabla 4. Escenarios de impacto en la tasa media de crecimiento del PIB per cápita nacional de acuerdo con proyecciones de temperatura.

	Emisiones bajas				Emisiones altas			
	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPI-ESM-MR	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPI-ESM-MR
Nacional	-1.96	-1.97	-1.97	-1.97	-2.01	-2.02	-2.04	-2.03

Fuente: Elaboración propia con datos de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Los escenarios de crecimiento económico nacional fueron realizados de igual manera para los ocho contextos de cambio en la precipitación que plantean los RCP. Los resultados señalan que el crecimiento económico promedio a nivel nacional podría reducirse como respuesta al cambio en la precipitación del país.

Cabe mencionar que dicho cambio en la precipitación podría generar reducciones en el PIB per cápita, que van de -1.59 a -1.66 por ciento en situaciones de emisiones bajas, y de entre -1.03 a -1.64 en emisiones altas (Tabla 5).

Tabla 5. Escenarios de impacto en la tasa media de crecimiento del PIB per cápita nacional de acuerdo con proyecciones de precipitación.

	Emisiones bajas				Emisiones altas			
	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPI-ESM-MR	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPI-ESM-MR
Nacional	-1.66	-1.62	-1.59	-1.62	-1.64	-1.58	-1.41	-1.03

Fuente: Elaboración propia con datos de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.



## 6.2 Estimaciones con base en modelos de panel

La robustez de los resultados obtenidos mediante la metodología de series de tiempo es corroborada en esta sección por medio de la estimación de modelos panel. En estos modelos, a diferencia de los de series de tiempo, es posible incluir la heterogeneidad entre individuos y la dinámica de los datos (rezagos). En el caso de este estudio es necesario controlar por la heterogeneidad (efectos fijos) individual, dado que las unidades de estudio están representadas por los diferentes estados de la república.

Para llevar a cabo el análisis del impacto del cambio en la temperatura media sobre el PIB per cápita mediante datos panel se proponen cuatro modelos, los cuales se diferencian por los supuestos que hay en cada especificación, esto en términos de los elementos específicos de los estados y de la composición del término de error (Tabla 6).

El primero de ellos es un modelo con datos agrupados (*pool*), el cual es estimado mediante Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO). En este tipo de modelos se asume que no existe heterogeneidad entre estados. No obstante, si la heterogeneidad individual es significativa, este tipo de modelo presentará un sesgo por omisión de variables.

Las siguientes estimaciones consisten en modelos de efectos aleatorios y efectos fijos. Los resultados de dichos modelos confirman que la heterogeneidad entre estados es significativa, dado que en el caso de los efectos aleatorios, se rechaza la hipótesis de que la varianza de los errores sea cero ( $\chi^2(1) = 19,786.25$ ), y en el caso de los efectos fijos, mediante el *test* de significatividad conjunta, se rechaza la hipótesis nula de que las *dummies* estatales no sean significativas ( $F(31,1649) = 109.68$ ).

De manera que efectivamente el modelo de MCO presenta resultados sesgados, motivo por lo cual los coeficientes van en sentido contrario al señalado por la mayoría de estudios previos. Dicho resultado, aparentemente contradictorio también, se muestra en los modelos de efectos aleatorios y de efectos fijos, a pesar de que la prueba de Hausman indica que existe heterogeneidad no observable en el término de error ( $\text{prob} > \chi^2 = 0.4398$ ).

Ahora bien, al realizar la prueba de significancia estadística de los rezagos se encontró que la mejor especificación consiste en un modelo de efectos fijos con un rezago en la variable dependiente. Los resultados de este último modelo señalan que el impacto es negativo, con una magnitud de -0.77 por ciento, resultado que corrobora la dirección de los resultados de modelos de series de tiempo (-1.76 por ciento).

Así mismo, es posible observar que la magnitud del impacto de la temperatura sobre el PIB per cápita es mayor cuando se trabaja con series de tiempo, que cuando se contempla la heterogeneidad entre estados del modelo de panel. Estos resultados podrían indicar un sesgo de sobreestimación en los resultados de series de tiempo, dado que en los modelos de panel se contempla la heterogeneidad entre estados. Sin embargo, estas cifras se encuentran en la misma dirección, por lo cual con ambas estimaciones se corrobora la robustez estadística de los impactos.

Tabla 6. Impacto del cambio en la temperatura en el crecimiento del PIB per cápita

Variable dependiente	Pool (MCO)	Efectos aleatorios	Efectos fijos	Efectos fijos con rezagos
Temperatura	0.22	1.49	2.19	-0.77
Constante	6.38	5.81	5.39	0.98
R <sup>2</sup>	0.46	0.45	0.44	0.97
Significatividad de efectos individuales		19,786.25	109.68	

Fuente: Estimaciones propias con base en datos de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Al igual que en el análisis de temperatura, se presentan cuatro diferentes especificaciones para estudiar la relación entre precipitación y crecimiento del PIB per cápita. Cada especificación contempla un supuesto diferente sobre el término de error y el comportamiento entre regiones (Tabla 7).

Los resultados del modelo de datos agrupados (*pool*), el cual asume que no existen diferencias en los impactos entre estados, muestran una relación negativa entre la variable de precipitación y el crecimiento del PIB per cápita.

Sin embargo, la significancia de los efectos individuales de la prueba de efectos aleatorios ( $\chi^2(1) = 16,831.48$ ) y la prueba de efectos fijos ( $F(31,1694) = 94.81$ ) indican que la heterogeneidad entre regiones debe contemplarse en la especificación del modelo. Así mismo, la prueba de Hausman ( $\text{prob} > \chi^2 = 0.0027$ ) corrobora que los efectos individuales son la especificación adecuada para el modelo.

Además, las pruebas de rezagos también señalan que debe incluirse un rezago en esta modelación. Es por ello que la mejor especificación de impacto de la precipitación sobre el PIB per cápita es la que incluye efectos fijos con un rezago en la variable dependiente. En esta correcta especificación, el aumento de 1 mm en la precipitación anual, producido por el cambio climático, tendría como consecuencia una caída del PIB per cápita de -0.01 por ciento, cifra que es consistente con la encontrada en los modelos de series de tiempo (-0.04 por ciento).

Tabla 7. Impactos del cambio en la precipitación en el crecimiento del PIB per cápita

Variable dependiente	Pool (MCO)	Efectos aleatorios	Efectos fijos	Efectos fijos con rezagos
Precipitación	-0.02	0.06	0.01	-0.01
Constante	7.79	6.39	6.39	0.94
R <sup>2</sup>	0.51	0.43	0.41	0.98
Significatividad de efectos individuales		16,831.48	94.81	

Fuente: Estimaciones propias con base en datos de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

## 7 Conclusiones

En el último siglo el clima del planeta ha experimentado cambios nunca antes vistos, los cuales se encuentran principalmente asociados con las acciones de la actividad humana.

La temperatura media, por ejemplo, ha aumentado sus niveles considerablemente, por su parte, los patrones de lluvia tienden a ser más variables, de manera que algunas regiones se ven afectadas por sequías, mientras que en otras se perciben precipitaciones extremas.

Diversos estudios han estimado que las manifestaciones del cambio climático y sus efectos serán mayores en las siguientes décadas (IPCC, 2014; Nordhaus, 1991). Además, se sabe que el cambio en las variables climáticas tiene también consecuencias en la esfera económica. A nivel global, la cuantificación de los impactos económicos del cambio climático aun es un importante desafío y existen pocos estudios que profundicen en el tema para nuestro país.

Es por ello que en este artículo se analizaron los efectos que el cambio climático genera sobre el crecimiento económico en México. Para ello, se estudió la relación que existe entre el crecimiento del PIB per cápita y las variables climáticas de temperatura y precipitación, con el control estadístico a través de otras variables determinantes del crecimiento económico.

La metodología empleada para la estimación de los impactos consistió en modelos de corrección de error, a partir de los cuales fueron realizados también escenarios de crecimiento económico para el periodo 2014-2100. Se incorporó la metodología de panel para corroborar la robustez de los resultados obtenidos con series de tiempo para controlar los efectos individuales de los estados.

Los resultados del estudio muestran que el cambio en las variables climáticas podría impactar de manera negativa el crecimiento del PIB per cápita de México. Un aumento de la temperatura media en 1.0°C podría reducir el crecimiento del PIB per cápita nacional entre -0.77 (metodología de panel) y -1.76 (metodología de series de tiempo) por ciento.

A escala subnacional, Baja California Norte e Hidalgo son las entidades más afectadas por el aumento de 1.0°C, donde el PIB per cápita podría reducirse en -7.52 por ciento y -6.84 por ciento, respectivamente. Por el contrario, el aumento de la temperatura podría afectar con poca intensidad a Sinaloa y Puebla, en éstos el aumento de 1°C tendría como consecuencia una caída del PIB per cápita de -0.33 por ciento y -0.37 por ciento, en cada caso. Sin embargo, es importante señalar que en todas las entidades federativas el cambio en la temperatura media mostró un impacto negativo sobre el PIB per cápita.

Así mismo, el aumento de 1 mm en los niveles de precipitación nacional tendría un efecto negativo sobre el crecimiento del PIB per cápita, de manera que este último se vería reducido entre -0.01 (metodología de panel) y -0.04 por ciento (metodología de series de tiempo). Entre los más afectados podrían ser Coahuila y Sonora (-0.27 por ciento y -0.23 por ciento, respectivamente). Mientras que el impacto podría ser nulo en Guanajuato y Nuevo León.

Aunque el efecto del cambio en esta variable es pequeño, resulta importante señalar que es negativo para el resto de los estados.

Finalmente, los escenarios económicos que fueron simulados en este estudio para el período 2014-2100 señalan que, de acuerdo con las proyecciones de cambios en la temperatura y en la precipitación, el crecimiento del PIB per cápita se vería reducido para finales del siglo XXI. Lo anterior bajo las ocho diferentes proyecciones RCP de cambio en las variables climáticas.

La variación de la temperatura podría incidir en la reducción del PIB per cápita del país entre -1.96 y -2.03 por ciento para el año 2100. De igual manera, el cambio en la precipitación podría frenar el crecimiento entre un -1.03 y -1.66 por ciento en dicho periodo.

Como se mencionó, las estimaciones realizadas mediante los modelos de panel muestran resultados muy similares a los de series de tiempo. Por lo cual los resultados entre ambas metodologías muestran consistencia y robustez, lo cual confirma que la variación en la temperatura y en la precipitación, provocados por el cambio climático, tendrán efectos adversos sobre el crecimiento económico per cápita del país, así mismo, estos efectos se manifestarán con mayor intensidad en algunos estados debido a la heterogeneidad entre regiones.

A partir de estas conclusiones es posible reiterar la importancia de las políticas orientadas a disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>, esto con una finalidad desde luego ambiental, pero también con la intención de disminuir los impactos en el crecimiento económico.

## 8 Bibliografía

Barrios, S., Bertinelli, L. y Strobl, E. (2010). Trends in Rainfall and Economic Growth in Africa: A Neglected Cause of the African Growth Tragedy. *Review of Economics and Statistics*, 92(2), pp. 350-366.

Belhabib, D., Lam, V. y Cheung, W. (2016). Overview of West African Fisheries Under Climate Change: Impacts, Vulnerabilities and Adaptive Responses of the Artesanal and Industrial Sectors. *Marine Policy*, 71, pp. 15-28.

Cachon, G., Gallino, S. y Olivares, M. (2012). Severe Weather and Automobile Assembly Productivity. Columbia Business School Research Paper NO. 12/37.

Dell, M., Jones, B. y Olken, B. (2008). Climate Change and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century. Working Paper 14132, National Bureau of Economic Research.

Dell, M., Jones, B. y Olken, B. (2009). Temperature and Income: Reconciling New Cross-Sectional and Panel Estimates. *American Economic Review: Papers & Proceedings*, 99(2), pp. 198-204.

Dell, M., Jones, B. y Olken, B. (2012). Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4(3), pp. 66-95.

Dell, M., Jones, B. y Olken, B. (2014). What Do We Learn from the Weather? The New Climate – Economy Literature. *Journal of Economic Literature*, 52(3), 740-798.

Deschênes, O. y Moretti, E. (2009). Extreme Weather Events, Mortality, and Migration. *The Review of Economics and Statistics*, 91(4), pp. 659-681.

Deschênes, O. y Greenstone, M. (2007). The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Profits and Random Fluctuations in Weather. *American Economic Review*, 97(1), pp. 354-385.

Estrada, F., Elissaios, P, et al. (2013). The economics of climate change in Mexico: implications for national/regional policy. *Climate Policy*, 13(6), pp. 738-750.

Federspiel, C., Fisk, W., Price, P. et al. (2004). Worker Performance and Ventilation in a Call Center: Analyses of World Performance Data for Registered Nurses. *Indoor Air*, 14(8), 41-50.

Gallup, J., Sachs, J. y Mellinger, D. (1999). Geography and Economic Development. Working Paper 6849, National Bureau of Economic Research.

Gay, C., Estrada, F., Conde, C. et al. (2006). “Potential Impacts of Climate Change on Agriculture: a Case of Study of Coffee Production in Veracruz, México”. *Climatic Change*, 79, 259-288. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9066-x>.

Gómez, J., Tinaco, J. y Monterroso, A. (2011). Efectos del Cambio Climático en la Distribución Potencial del Maíz en el Estado de Jalisco, México. *Terra Latinoamericana*, 29(2), pp. 161-168.

Horowitz, J. (2009). The Income-Temperature Relationship in a Cross-Section of Countries and its Implications for Predicting the Effects of Global Warming. *Environmental Resource Econ*, 44, pp. 475-493.

Hsiang, S. (2010). Temperatures and Cyclones Strongly Associated with Economic Production in the Caribbean and Central America. *PNAS*, 107(35), 15367-15372.

IPCC, (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. Ginebra, Suiza: IPCC, 157 págs.

Jones, B. y Olken, B. (2010). Climate Shocks and Exports. *American Economic Review: Papers & Proceeding*, 100(2), pp. 454-459.

Niemela, R., Hannula, M., Rautio, S. et al. (2002). The Effect of Air Temperature on Labour Productivity in Call Centres – a case study. *Energy and Buildings*, 34, pp. 759-764.

National Aeronautics and Space Administration, (2011). What Are Climate and Climate Change?. [Online] Disponible en:

<https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-climate-change-58.html> [Consultado 10 oct. 2017]

Nordhaus, W. (1991). A Sketch of the Economics of the Greenhouse Effect. *The American Economic Review*, 81(2), pp. 146-150.

Nordhaus, W. (2006). Geography and Macroeconomics: New Data and New Findings. *PNAS*, 3(10), 3511-3517.

Sachs, J. (2001). Tropical Underdevelopment. Working Paper 8119, National Bureau of Economic Research.

Senapati, M., Behera, B. y Mishra, R. (2012). Impact of Climate Change on Indian Agriculture & Its Mitigating Priorities. *American Journal of Environmental Protection*, 1(4), pp. 109-111.

Schlenker, W., Henemann, M. y Fisher, A. (2006). The impact of Global Warming on U.S. Agriculture: An Econometric Analysis of Optimal Growing Conditions. *The Review of Economics and Statistics*, 88(1), pp. 113-125.

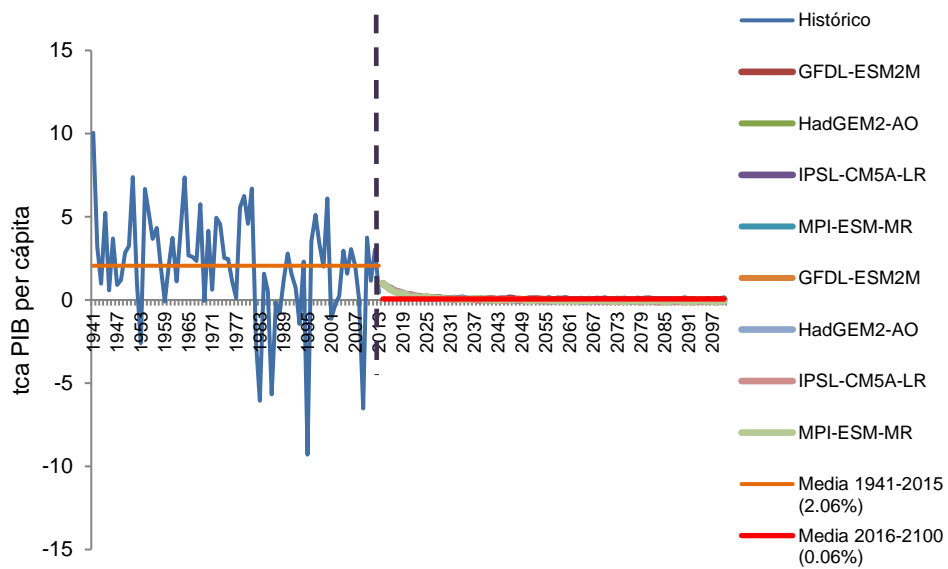
Tol, R. (2009). The Economic Effects of Climate Change. *Journal of Economic Perspectives*, 23(2), pp. 29-51.

Tol, R. (2014). Correction and Update: The Economic Effects of Climate Change. *Journal of Economic Perspectives*, 28(2), pp. 221-226.

## 9 Anexos

### Anexo A.1. Crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con escenarios de temperatura y precipitación nacional.

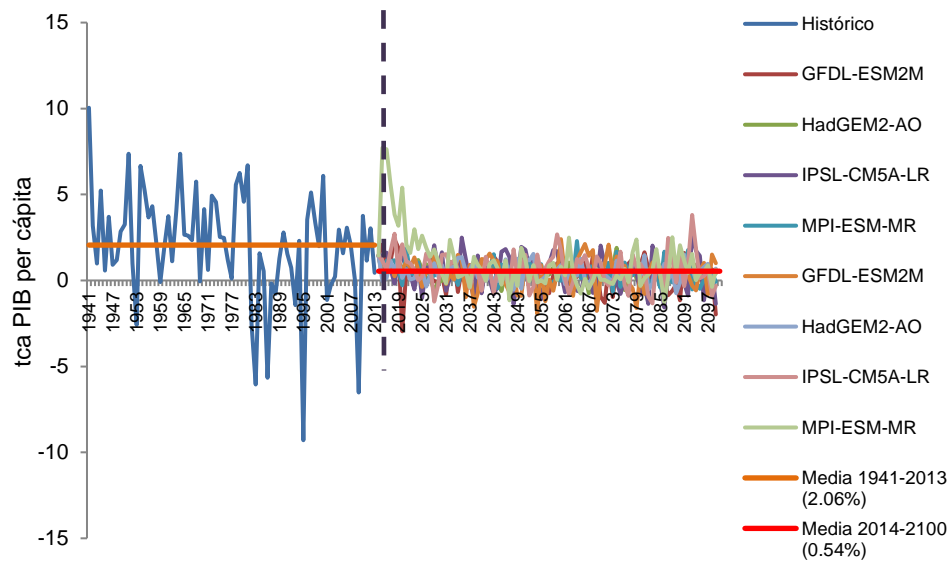
Gráfica 7 A1. Crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con escenarios de temperatura para México (1941-2100)



Fuente: Elaboración propia con datos de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.



Gráfica 8 A1 Crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con escenarios de temperatura para México (1941-2100)



Fuente: Elaboración propia con datos de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.



Plataforma de colaboración sobre  
**CAMBIO CLIMÁTICO  
Y CRECIMIENTO VERDE**  
entre Canadá y México

Este documento fue desarrollado en el marco de la Plataforma de  
Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y  
México, todos los derechos reservados

Derechos reservados © 2018

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CDMX C.P. 11000

[www.mx.undp.org](http://www.mx.undp.org)

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Blvd. Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, CDMX CP. 14210

[www.gob.mx/inecc](http://www.gob.mx/inecc)



Environment  
Canada

Environnement  
Canada

**SEMARNAT**  
SECRETARÍA DE  
MEDIO AMBIENTE  
Y RECURSOS NATURALES



**INECC**  
INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA  
Y CAMBIO CLIMÁTICO



Al recibir  
de los 197 países  
y las naciones