



ALTAS TEMPERATURAS Y ESCASEZ DE LLUVIA: EL
IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ACTIVIDAD
ECONÓMICA DE CHILE

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN ANÁLISIS ECONÓMICO

Alumna: María Teresa Reszczynski Zúñiga
Profesora Guía: Nathaly M. Rivera

Santiago, Junio 2023

Altas Temperaturas y Escasez de Lluvia: El Impacto del Cambio Climático en la Actividad Económica de Chile

María Teresa Reszczyński

Profesora guía: Nathaly M. Rivera

Junio 2023

Resumen

Este trabajo estudia el impacto que ha tenido el cambio climático en la actividad económica chilena a través un modelo de crecimiento estocástico donde la actividad económica es afectada por variaciones de la temperatura y precipitación respecto de sus normas históricas. Para esto, se utiliza un panel regional entre el primer trimestre de 1997 y el cuarto trimestre de 2019 para cada una de las industrias del PIB de Chile. Los resultados muestran que el cambio climático tiene efectos negativos sobre el PIB. Específicamente, un aumento de la temperatura tiene un impacto negativo y significativo en la actividad económica para la gran mayoría de las industrias del PIB de Chile. Con respecto a la precipitación, se encuentra que una caída en la precipitación afecta negativamente la actividad sólo en la industria Agropecuaria-silvícola, revelando la heterogeneidad en los impactos que el cambio climático puede generar en la economía chilena. Ejercicios adicionales muestran que durante el verano, el impacto de la mayor temperatura y menor precipitación en el PIB es mayor que en otras estaciones, además de que al utilizar datos de temperatura máxima los efectos encontrados en la actividad se ven amplificadas. Por último, se encuentra que las olas de calor y épocas de sequía exacerban los resultados mencionados anteriormente.

Abstract

This paper studies the impact that climate change has had on Chilean economic activity through a stochastic growth model where economic activity is affected by variations in temperature and precipitation with respect to their historical norms. For this, a regional panel is used between the first quarter of 1997 and the fourth quarter of 2019 for each of the Chilean GDP industries. The results show that climate change has negative effects on GDP. Specifically, an increase in temperature has a negative and significant impact on economic activity for the vast majority of Chile's GDP industries. With respect to precipitation, it is found that a drop in precipitation negatively affects activity only in the Agricultural-forestry industry, revealing the heterogeneity in the impacts that climate change can generate in the Chilean economy. Additional exercises show that during the summer, the impact of higher temperatures and less precipitation on GDP is greater than in other seasons, in addition to the fact that when using maximum temperature data, the effects found in activity are exacerbated. Finally, it is found that heat waves and dry seasons exacerbate the aforementioned results.

1. Introducción

El cambio climático es una realidad y sus efectos en Chile ya son perceptibles. En los últimos 100 años, la temperatura media en Chile ha aumentado en alrededor de 0.5 grados Celsius, al tiempo que la precipitación total que cae dentro de un año ha caído en cerca de 200 milímetros, principalmente durante las últimas dos décadas (ver Figura 1). Estas tendencias serán exacerbadas en los próximos años. Proyecciones del Banco Mundial indican que la temperatura media seguirá aumentando y la precipitación total seguirá cayendo.¹

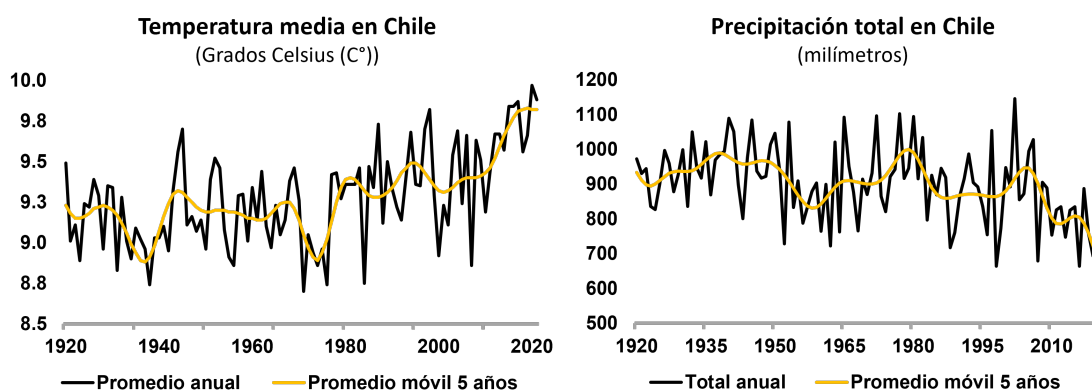


Figura 1: Temperatura y Precipitación Histórica en Chile

Notas: Esta figura muestra a la izquierda la temperatura media en Chile para cada año desde el 1920 hasta el 2020. Esto se obtiene a partir de datos mensuales de temperatura media a los que se calcula el promedio de temperatura anual (en grados Celsius). A la derecha de la Figura 1 se muestra la precipitación anual total en Chile para cada año desde el 1920 hasta el 2020. Esto se obtiene a partir de datos de precipitación total mensual, y luego se calcula la suma para obtener la precipitación total anual (en milímetros). Fuente: elaboración propia en base a datos del Banco Mundial.

Muchos estudios han encontrado que el cambio climático tiene implicancias económicas negativas (Burke et al., 2015; Hernández y Madeira, 2022; IMF, 2017; Kahn et al, 2021; OECD, 2015; Roson y Santori, 2016), donde si bien existe una gran heterogeneidad en la magnitud de los efectos encontrados, hay un amplio consenso en que el cambio climático tiene un efecto negativo en la actividad económica.

Este trabajo contribuye a la literatura anterior al estudiar el impacto del cambio climático en la actividad económica chilena utilizando datos sectoriales con frecuencia trimestral y

¹Ver Apéndice 1.

a nivel regional. Esto permite capturar de mejor manera tanto la diversidad climática que presenta Chile a lo largo de sus regiones como el impacto diferenciado que podría tener el cambio climático en cada industria del PIB. Adicionalmente, el uso de datos trimestrales permite capturar de mejor manera las variaciones de temperatura que caracterizan a Chile y, por lo tanto, el crecimiento del PIB regional dentro de un mismo año. Además, la metodología utilizada corrige posibles sesgos de metodologías utilizadas en trabajos anteriores, en particular, el que tiene que ver con utilizar variables de clima en nivel en estimaciones donde la variable dependiente está en variación anual, como por ejemplo, en Burke et al (2015) y en Hernández y Madeira (2022). Por último, la realización de ejercicios adicionales que intentan ver si existe heterogeneidad en los impactos del cambio climático según la estación del año, así como también la utilización de datos de temperatura máxima y mínima, como también olas de calor y sequía, constituyen innovaciones en cuanto a la literatura ya existente.

Para cuantificar el impacto del cambio climático en el PIB, se utiliza un modelo de crecimiento estocástico, donde la actividad económica es afectada por variaciones en temperatura y precipitación. Específicamente, se estima un Modelo de Rezagos Distribuidos (ADL, por sus siglas en inglés) para un panel regional, con efecto fijo por región. Se utilizan datos de PIB regional en frecuencia trimestral desde el primer trimestre de 1997 hasta el cuarto trimestre de 2019 desde la Base de Datos Estadísticos del Banco Central de Chile para cada una de las industrias del PIB de Chile. Por su parte, las variables de cambio climático se refieren a cambios en temperatura y precipitación media para 13 de las regiones de Chile. Adicionalmente, se realizan estimaciones con temperaturas máximas y mínimas, para intentar cuantificar también el efecto de temperaturas extremas en la actividad económica.

Los resultados muestran que el cambio climático tiene efectos negativos sobre el PIB. Específicamente, un aumento de la temperatura tiene un impacto negativo y significativo en la actividad económica para la gran mayoría de las industrias del PIB de Chile. Con respecto a la precipitación, se encuentra que una caída en la precipitación afecta negativamente la actividad sólo en la industria Agropecuaria-silvícola, revelando la heterogeneidad en los im-

pactos que el cambio climático puede generar en la economía chilena. Ejercicios adicionales muestran que durante el verano el impacto de la mayor temperatura y menor precipitación en el PIB es mayor que en otras estaciones, y estimaciones que incluyen temperaturas máximas y mínimas indican que los efectos negativos en el PIB están asociados a incrementos en la temperatura máxima, mientras que los efectos en el aumento de la temperatura mínima son menos evidentes. Por último, se encuentra que las olas de calor y épocas de sequía exacerban los resultados mencionados anteriormente.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se hace una revisión de la literatura y se menciona de manera más específica las contribuciones de este artículo a la literatura ya existente. La Sección 3 presenta el modelo teórico, la Sección 4 describe los datos utilizados y la Sección 5 la metodología. Los resultados se presentan en la Sección 6, y, por último, la Sección 7 resume las principales conclusiones de este trabajo, las limitaciones del mismo y posibles implicancias de política.

2. Revisión de Literatura

La mayoría de los trabajos que estudian el impacto del cambio climático en el PIB utilizan un panel de países, por lo que los efectos encontrados son el efecto promedio del cambio climático en una serie de países. En esta línea, se encuentra el trabajo de Roson y Santori (2016) quienes realizan una serie de meta análisis destinados a estimar parámetros para 140 países de seis funciones de daño: aumento del nivel del mar; productividad agrícola; productividad laboral; salud de las personas; flujos de turismo; y demanda de energía de los hogares. Luego, agregan las funciones de daño para tener el impacto sobre el PIB (aproximación de primer orden). Los autores encuentran que los efectos negativos del cambio climático recaerán principalmente en los países en desarrollo ubicados en regiones tropicales, y para Chile, encuentran que bajo un escenario de aumento de 1 grados Celsius de temperatura tendría un impacto en el PIB de -0,26 % para el 2100. Otro trabajo que utiliza un panel de

países para ver el efecto del cambio climático en el PIB es el de Kahn et al (2021). Los autores desarrollan un modelo de crecimiento estocástico donde la productividad es afectada por desviaciones de la temperatura y precipitación de sus promedios históricos. Usan un panel de 174 países entre los años 1960 y 2014 para estudiar los efectos de largo plazo del cambio climático en la actividad económica. Los resultados muestran que los *shocks* climáticos tienen un efecto negativo de largo plazo en el crecimiento del PIB per cápita: un aumento persistente de la temperatura global de $0,04^{\circ}\text{C}$ cada año, y en ausencia de políticas de mitigación, reduciría el PIB global per cápita en más de 7% en el 2100. Para Chile, encuentran que bajo un escenario de aumento de 1 grados Celcius de temperatura tendría un impacto en el PIB de -5,18% para el 2100.

Un trabajo más reciente que utiliza datos a nivel regional para Chile es el de Hernández y Madeira (2022) quienes analizan el impacto de la precipitación y temperatura en el PIB de Chile usando un panel por industrial y región entre los años 1985 y 2017 en frecuencia anual. Los autores no encuentran efectos de la precipitación en el PIB, y efectos negativos de mayores temperaturas en los meses de verano en Agricultura-Silvicultura y Pesca. Específicamente, un aumento de 1 grado Celcius en el mes de Enero implica una caída de 3% y 12% en el PIB de Agricultura y Pesca, respectivamente. Los autores concluyen que el cambio climático no ha tenido un gran impacto en la economía chilena durante el periodo de estudio. No obstante, realizan ejercicios de *stress test* y concluyen que el PIB en Chile podría caer entre -14,8% y -9% en el año 2015, y entre -29,6% y -16,8% en el año 2100 debido al cambio climático.

Las contribuciones de este trabajo a la literatura ya existente son varias. En primer lugar, este trabajo utiliza datos regionales y por industrias específicos para Chile, y no un panel de países como la mayoría de los trabajos a nivel internacional. Esto permite capturar de mejor manera tanto la diversidad climática que presenta Chile a lo largo de sus regiones como el impacto diferenciado que podría tener el cambio climático en cada industria del PIB. La segunda contribución tiene que ver con la frecuencia de datos utilizada. Este trabajo utiliza

una serie de PIB trimestral por industria y región, lo que permite capturar de mejor manera el impacto del cambio climático en el PIB, ya que los promedio anuales pueden esconder grandes variaciones, tanto del PIB como de la temperatura y precipitación. La tercera contribución tiene que ver con la metodología utilizada, la que consiste en modelo de crecimiento estocástico donde la actividad económica es afectada por variaciones de la temperatura y precipitación respecto de sus normas históricas. La contribución de utilizar esta metodología tiene que ver con la tendencia que presentan las variables de cambio climático al tiempo que la variación anual del PIB no presenta tendencia, al menos no en todas las industrias y regiones (ver Apéndice 2), por lo tanto, incluir como variables explicativas el nivel de temperatura y precipitación dará resultados espurios.² La metodología utilizada en este trabajo se explicará en detalle en la Sección 5. Por último, la cuarta contribución tiene que ver con el análisis adicional que toma en cuenta eventos de clima más extremos, incluyendo en la estimación datos de temperatura máxima y mínima, así como eventos de olas de calor y sequías.

3. Modelo Teórico

Para entender los mecanismos por los cuales el cambio climático afecta la actividad económica, en este trabajo se utilizará el enfoque de función de producción (Batten, 2018; Dietz, 2015). El enfoque de función de producción es una manera de estudiar la compleja y heterogénea relación del impacto del cambio climático en los distintos sectores de la economía (distintos canales de transmisión), donde se relaciona cada impacto del cambio climático en las diferentes variables de la función de producción en cada período t :

$$Y_t = A_t F(K_t, L_t). \tag{1}$$

²En el apéndice del trabajo de Kahn et al (2021) se explica matemáticamente lo anterior.

$$K_{t+1} = (1 - D_t^k)(1 - \delta)K_t + I_t. \quad (2)$$

$$A_{t+1} = (1 - D_t^A)A_t. \quad (3)$$

La Ecuación (1) representa la función de producción donde el producto Y_t depende de la productividad A_t y una función que relaciona tanto el *stock* de capital físico K_t y el trabajo L_t . Por su parte, la Ecuación (2) indica que, en cada periodo, el *stock* de capital físico se incrementa a través de la inversión de capital I_t y decrece debido a la depreciación (δ) y el cambio climático, definido como D_t^k . Esto último representa el efecto directo del cambio climático en el *stock* de capital físico, por ejemplo, a través de la pérdida de capital en las zonas costeras debido al aumento del nivel del mar, o, por ejemplo, si el cambio climático aumenta la probabilidad de tormentas y esas tormentas dañan la infraestructura. Por último, la Ecuación (3) indica que, en cada periodo, la productividad se ve afectada de manera negativa por el cambio climático (D_t^A), donde por ejemplo, mayores temperaturas puede reducir la productividad de los trabajadores.

En este trabajo, si bien no se desarrolla un modelo para estimar el impacto del cambio climático en el capital y la productividad, se realiza una estimación en forma reducida del impacto del cambio climático en el Producto Interno Bruto (PIB) de Chile. Así, como *proxy* de Y_t se utiliza el PIB para cada una de las regiones e industrias de Chile, y como *proxy* de D se utilizarán datos de temperatura y precipitación.

4. Datos

4.1. Producto Interno Bruto

Los datos del Producto Interno Bruto (PIB) vienen desde la Base de Datos Estadísticos del Banco Central de Chile para los años 1996 hasta 2019. Específicamente, se utilizan datos a

nivel regional por actividad económica para 13 regiones de Chile con frecuencia trimestral.³

El análisis se realizará para las 12 actividades económicas del PIB que se muestran en el Cuadro 1.⁴

Cuadro 1: Actividades Económicas Consideradas en el PIB de Chile

Código	Actividad Económica	Participación en el PIB (%)
1	Agropecuario-silvícola	3.5
2	Pesca	0.5
3	Minería	15.1
4	Industria manufacturera	12.7
5	Electricidad, gas, agua y gestión de desechos	4.0
6	Construcción	6.8
7	Comercio, restaurantes y hoteles	10.9
8	Transporte, información y comunicaciones	8.2
9	Servicios financieros y empresariales	14.9
10	Servicios de vivienda e inmobiliarios	8.2
11	Servicios personales	11.5
12	Administración pública	5.2

Notas: Esta tabla muestra las doce actividades económicas o industrias del PIB de Chile, cada una con su respectivo código. Además, la última columna muestra la participación (%) promedio de cada una de las industrias en el PIB total entre el año 1985 y 2017. Fuente: elaboración propia en base a datos del Banco Central de Chile.

Al no contar con una serie histórica con los datos por actividad económica a nivel regional trimestral (los datos de PIB regional por actividad económica comienzan desde el primer trimestre de 2013), se armó una base a partir de datos de PIB nominal anual regional por actividad económica desde la Base de Datos Estadísticos del Banco Central de Chile.⁵

³Antes de 2007, Chile estaba dividido en 13 regiones. En el año 2007, la región de Tarapacá (región I) fue dividida entre la región de Tarapacá (región I) y la región de Arica y Parinacota (región XV), y la región de Los Lagos (región X) fue dividida entre la región de Los Lagos (región X) y la región de los Ríos (región XIV). Luego, en el año 2018 la región del Bío-Bío (región VIII) fue dividida entre la región del Bío-Bío (región VIII) y la región del Ñuble (región XVI). Dado que en las series de cuentas nacionales la región XIV y XV comienzan desde la serie de referencia 2008, y la región XVI desde la serie de referencia 2018, se sumaron los datos de la región I y XV, X y XIV y VIII y XVI. Es decir, se considerarán 13 regiones de Chile para el análisis de este trabajo.

⁴Para la serie de referencia 2018, la actividad Comercio, Restaurantes y Hoteles estaba dividida en dos: (i) Comercio; y (ii) Restaurantes y Hoteles. Para hacer las series comparables entre distintas bases, para la base referencia 2018 se suman estas categorías de actividad económica para crear la serie Comercio, Restaurantes y Hoteles.

⁵Se usan datos nominales debido a que las series de PIB regional por actividad económica de la base 1996 sólo están disponibles de manera nominal. De todas formas, dado que estos datos se utilizan para conocer

A partir de estos datos, se calculó la ponderación de cada región para cada una de las actividades económicas a nivel nacional para cada año desde 1996 hasta el 2019:⁶ La Ecuación (4) muestra el cálculo realizado.⁷

$$Ponderación_{r,a,y} = \frac{PIB_{r,a,y}}{PIB_{a,y}} * 100, \quad (4)$$

donde r corresponde a la región, a a la actividad económica e y al año. El PIB nacional, $PIB_{a,y}$, se construye a partir de la suma de los PIB regionales, por lo tanto:

$$\sum_{r=1}^{13} PIB_{r,a,y} = PIB_{a,y}, \quad (5)$$

y por ende se cumple que:

$$\sum_{r=1}^{13} Ponderación_{r,a,y} = 100. \quad (6)$$

En el Cuadro 2 se reporta el promedio de las ponderaciones entre los años 1996 hasta 2019 de las 13 regiones de Chile para cada una de las 12 actividades económicas del PIB.

Una vez obtenida la ponderación anual de cada región en cada una de las 12 actividades económicas del PIB de Chile, se calcula el PIB trimestral regional por actividad económica. Esto se realiza a partir de la serie de PIB por actividad económica a nivel nacional desde la Base de Datos Estadísticos del Banco Central de Chile que cuenta con datos desde el primer trimestre de 1996 hasta el segundo trimestre de 2022.⁸ Luego, para cada actividad económica en cada trimestre se multiplica la ponderación antes encontrada, y así, obtenemos una serie trimestral a nivel regional por actividad económica para el periodo 1T.1996 hasta la ponderación de cada actividad y región en el PIB nacional, no afecta la interpretación de los resultados.

⁶Se utilizan datos desde 1996 para poder luego construir las variaciones anuales del PIB a partir del año 1997.

⁷En algunos años, algunos datos de PIB en ciertas regiones eran negativos. Estos datos se reemplazaron por ceros.

⁸Series empalmadas, volumen a precios del año anterior encadenados. Referencia 2018, miles de millones de pesos encadenados.

Cuadro 2: Ponderaciones Regionales en las Actividades Económicas del PIB de Chile. Promedio 1996-2019.

Región/Actividad Económica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	PIB regional total
I	0.9	6.8	10.7	2.1	2.2	3.5	4.5	3.0	1.2	2.4	2.6	5.6	3.6
II	0.1	2.4	53.5	2.6	10.9	10.7	2.6	4.9	2.3	3.3	3.4	3.3	8.9
III	1.9	2.0	9.4	0.3	3.9	3.3	1.2	1.4	0.9	1.4	1.3	1.8	2.2
IV	5.1	3.1	6.1	1.1	2.0	4.3	2.1	2.3	1.6	2.9	3.0	2.9	2.8
V	9.9	2.9	6.2	10.8	10.4	9.9	5.9	13.4	4.7	10.1	8.9	12.2	8.8
RM	12.9	0.0	5.0	48.6	26.0	39.1	64.9	51.7	76.5	54.8	52.2	41.2	47.4
VI	20.3	0.3	7.0	4.1	4.5	5.7	3.2	2.8	1.9	3.6	3.3	3.1	4.4
VII	14.9	0.5	0.1	4.8	12.5	4.0	2.6	3.4	1.6	3.5	4.0	3.9	3.7
VIII	14.3	19.4	0.2	16.1	19.5	9.3	5.7	7.6	4.7	8.6	10.3	9.3	8.9
IX	8.0	0.3	0.1	2.2	1.8	3.7	2.3	2.5	1.4	3.6	4.1	4.5	2.7
X	11.0	40.1	0.1	5.6	5.0	4.7	3.8	4.9	2.4	4.5	5.5	6.0	4.7
XI	0.4	15.3	0.3	0.2	0.4	0.8	0.3	0.5	0.2	0.4	0.6	2.3	0.6
XII	0.5	6.9	1.3	1.5	0.9	1.0	0.9	1.4	0.6	1.1	0.9	3.8	1.3
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Notas: Esta tabla muestra la ponderación promedio entre los años 1996 y 2019 de 13 regiones de Chile en cada una de las industrias del PIB de así como la ponderación en el PIB nacional total (última columna). La última fila indica que la suma de las ponderaciones regionales es 100%. Fuente: elaboración propia en base a datos del Banco Central de Chile.

4T.2019.^{9,10} El cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$PIB_{r,a,q,y} = Ponderación_{r,a,y} * PIB_{a,q,y}, \quad (7)$$

donde q representa el trimestre. Cabe destacar también que esta metodología supone que para cada región, la ponderación al PIB nacional para cada una de las actividades económicas es constante dentro de un mismo año.

4.2. Temperatura y Precipitación

Los datos de temperatura y precipitación se obtuvieron desde el *Climate Change Knowledge Portal* del Banco Mundial para las 13 regiones de Chile consideradas en este trabajo. La frecuencia de los datos es mensual para el periodo enero de 1901 hasta diciembre de 2021.

⁹Al igual que en los datos anuales del PIB regional por actividad económica, esta serie separa Comercio, Restaurantes y Hoteles.^{en} dos: (i) Comercio; y (ii) Restaurantes y Hoteles. Para hacer las series comparables a la serie anual regional, se suman estas categorías de actividad económica para crear la serie Comercio, Restaurantes y Hoteles⁷.

¹⁰El análisis de este trabajo deja fuera el periodo pandemia y post pandemia, es decir, no considera los años 2020, 2021 ni 2022.

Los Cuadros 3 y 4 muestran la temperatura y precipitación promedio, respectivamente, para tres agrupaciones de años. Se ve que en las regiones más al sur de Chile (regiones X, XI y XII) la temperatura promedio es menor, y la precipitación promedio es mayor. Además, se observa que en general, todas las regiones han experimentado aumentos en su temperatura promedio y una disminución en la precipitación promedio a lo largo de los años.

Dado que la frecuencia utilizada en este trabajo es trimestral, para la temperatura se calcularon promedios de la temperatura para cada uno de los meses que compone cada trimestre, y para la precipitación se calculó la suma de la precipitación de los meses que componen cada trimestre.

Cuadro 3: Temperatura promedio en las regiones de Chile (grados Celcius)

Región/Años	1901-1950	1951-2000	2001-2019
I	11.4	11.3	11.3
II	11.0	11.1	11.4
III	10.0	10.2	10.6
IV	10.2	10.5	10.9
RM	9.6	9.9	10.3
V	11.2	11.6	12.0
VI	11.1	11.4	11.8
VII	11.5	11.8	12.1
VIII	11.8	12.0	12.3
IX	10.5	10.7	10.9
X	8.6	8.7	8.9
XI	6.2	6.3	6.5
XII	5.8	5.7	6.0

Notas: Esta tabla muestra la temperatura anual promedio para 13 regiones de Chile para tres períodos de tiempo. La temperatura anual promedio se calcula desde datos de temperatura promedio mensual, a los que se les calcula luego un promedio anual, y de estos promedios anuales luego se calcula un promedio para cada uno de los tres periodos de tiempo. Fuente: elaboración propia en base a datos del Banco Mundial.

4.3. Temperatura Máxima y Mínima

Los datos de temperatura máxima y mínima provienen desde la Dirección Meteorológica de Chile de la Dirección General de Aeronáutica Civil, donde se obtienen datos desde cada

Cuadro 4: Precipitación promedio en las regiones de Chile (milímetros)

Región/Años	1901-1950	1951-2000	2001-2019
I	3.5	3.5	3.5
II	4.6	4.5	3.7
III	8.1	7.2	6.7
IV	18.1	16.4	15.2
RM	47.1	44.8	40.2
V	35.4	32.8	29.4
VI	62.4	57.5	50.1
VII	82.9	73.6	65.0
VIII	131.0	120.7	109.2
IX	160.2	151.5	143.1
X	155.5	151.2	142.3
XI	160.0	157.8	145.6
XII	147.0	136.5	138.9

Notas: Esta tabla muestra la precipitación promedio anual para 13 regiones de Chile para tres períodos de tiempo. La precipitación anual promedio se calcula desde datos de precipitación total mensual, a los que se les calcula luego un promedio anual, y de estos promedios anuales luego se calcula un promedio para cada uno de los tres periodos de tiempo. Fuente: elaboración propia en base a datos del Banco Mundial.

estación de monitoreo del Sistema de Administración de Datos Climatológicos (SACLIM)¹¹.

Por un lado, se obtienen datos mensuales por región de temperatura máxima y mínima, y por otro, se obtienen datos diarios por región de temperatura máxima para calcular así el número de días en que la temperatura máxima supera cierto umbral. En los Cuadros 5 y 6 se muestra la temperatura máxima y mínima por región, respectivamente, para dos agrupaciones de años. Cabe destacar que, a diferencia de los datos del Banco Mundial, la disponibilidad de datos para temperatura máxima y mínima es menor, donde por un lado, no existen datos para a la sexta región, y por otro lado, los datos de las regiones I y III no cumplen con el criterio de al menos 30 años de datos desde el primer trimestre de estimación (primer trimestre de 1997)¹². Por lo tanto, para las estimaciones que utilizan datos de temperatura máxima y mínima se excluirán las regiones I, III y VI.

¹¹En el Apéndice 3 se muestra la estación por región y el año desde donde comienzan los datos de cada estación.

¹²Esto se explicará en detalle en la sección de Metodología.

Cuadro 5: Temperatura Máxima y Mínima por Región (grados Celcius)

	Temperatura Máxima		Temperatura Mínima	
	1967-2000	2001-2019	1967-2000	2001-2019
II	22.8	22.4	11.2	11.6
IV	21.7	22.2	7.2	7.4
RM	29.3	30.3	4.0	4.5
V	22.9	23.3	2.5	3.2
VII	26.6	27.4	1.7	2.6
VIII	22.4	22.8	2.6	3.0
IX	24.1	25	0.0	-0.9
X	20.3	20.4	0.1	0.1
XI	20.0	20.7	2.2	-2.6
XII	15.1	15.7	-2.7	-2.3

Notas: Esta tabla muestra la temperatura máxima y mínima absoluta anual promedio para 10 regiones de Chile para dos períodos de tiempo. La temperatura anual se calcula desde datos de temperatura máxima y mínima absoluta mensual, a los que se les calcula luego un promedio anual, y de estos promedios anuales luego se calcula un promedio para cada uno de los dos periodos de tiempo. Fuente: elaboración propia en base a datos de la Dirección de Aeronáutica de Chile.

5. Metodología

Este trabajo utiliza la metodología de Kahn et al (2021) al estimar un modelo de crecimiento estocástico, donde el crecimiento del PIB es afectado por desviaciones de la temperatura y precipitación de su norma histórica. Para esto, se estimará un Modelo de Rezagos Distribuidos (ADL)¹³ para un panel regional con datos trimestrales entre el primer trimestre de 1997 hasta el cuarto trimestre de 2019 para cada una de las 12 actividades económicas del PIB de Chile. Por lo tanto, el modelo a estimar es el siguiente:

$$\Delta y_{r,q,y} = \alpha_r + \sum_{l=1}^p \phi_l \Delta y_{r,q,y-l} + \sum_{i=0}^p \beta_i \Delta x_{r,q,y-l} + \varepsilon_{r,q,y}, \quad (8)$$

donde Δy corresponde al crecimiento interanual del PIB medido en puntos porcentuales; α_r es un efecto fijo por región; Δx es un vector que agrupa las variables de temperatura y

¹³Tal como se señala en Kah et al (2021), los modelos SDL se utilizan para análisis de largo plazo (como el análisis realizado en esta tesis), es válido independiente si las variables son integradas de orden cero o uno (I(0) o I(1)), y es robusto a la omisión de variables así como a la doble causalidad entre el crecimiento económico y sus determinantes.

precipitación y es una medida de clima relativa a su norma histórica; l es la cantidad de rezagos, y ε corresponde al término del error. El vector Δx es una medida de clima relativa a su norma histórica obtenida a partir de:

$$\tilde{T} = [T_{r,q,y} - T^*_{r,q,y}] \quad (9)$$

$$\tilde{P} = [P^*_{r,q,y} - P_{r,q,y}], \quad (10)$$

donde T es la temperatura medida en grados celcius (C°) y P es la precipitación medida en milímetros. Cabe destacar que para la precipitación la medida de clima relativa a su norma histórica es al revés que la temperatura, ya que nos interesa ver el impacto de una menor precipitación respecto de su norma histórica, mientras que para la temperatura nos interesa ver el impacto de una mayor temperatura respecto de su norma histórica. Dada la estacionalidad que presenta cada trimestre (primer trimestre hace más calor que el tercer trimestre, por ejemplo), se calcula una norma histórica para cada trimestre del año (ver Ecuaciones (11) y (12)). En el Cuadro 6 se observa el promedio de la desviación de temperatura y precipitación de sus respectivas normas históricas para cada una de las 13 regiones analizadas en este trabajo. Se ve que para la gran mayoría de las regiones, los desvíos de temperatura son positivos, es decir, la temperatura en promedio es mayor a los que ha sido su norma histórica, siendo la magnitud de esto aproximadamente 0,2 grados Celsius (promedio entre todas las regiones). Con respecto a la precipitación, se observa que para la mayoría de las regiones la desviación respecto de su norma histórica es negativa, lo que quiere decir que, en promedio, la precipitación es menor de lo que ha sido su norma histórica, siendo la magnitud de esto aproximadamente -12,2 milímetros (promedio entre todas las regiones). En la sección de resultados se utilizarán estos valores promedios para calibrar los efectos del cambio climático en la actividad económica.

Cabe destacar que si bien en este trabajo se estima el impacto del cambio climático en

el crecimiento del PIB, el cambio climático podría también afectar el nivel del PIB, y en la literatura aún no hay consenso en cuanto a si el cambio climático afecta el nivel del PIB o su tasa de crecimiento (Kahn et al , 2021). Por otro lado, Colacito et al (2019) señala que es importante distinguir entre esas dos hipótesis, porque los efectos sobre la tasa de crecimiento se acumulan con el tiempo, y por lo tanto, son cuantitativamente más relevantes que los efectos sobre el nivel del PIB.

Cuadro 6: Desvíos de Temperatura y Precipitación de sus normas históricas (promedio desvíos entre años 1997 y 2019)

Región	Desvíos Temperatura	Desvíos Precipitación
I	-0.03	0.22
II	0.11	-2.30
III	0.14	-1.09
IV	0.18	-1.19
RM	0.21	-10.61
V	0.20	-7.49
VI	0.22	-19.18
VII	0.22	-23.64
VIII	0.19	-30.16
IX	0.20	-27.33
X	0.23	-19.66
XI	0.19	-30.86
XII	0.14	3.10

Notas: Esta tabla muestra el promedio de los desvíos de temperatura (grados celcius) y precipitación (milímetros) respecto de sus normas históricas para 13 regiones de Chile. El promedio de los desvíos se calcula desde el año 1997 y 2019, y las normas históricas corresponden a promedios móviles de 30 años tanto para la temperatura y precipitación, calculados para cada trimestre. Fuente: elaboración propia en base a datos del Banco Mundial.

La cantidad de rezagos l óptimos se obtiene desde Kahn et al (2021), quienes utilizan cuatro rezagos, ya que señalan que dado que el interés está en estimar efectos de largo plazo, la cantidad de rezagos debe ser lo suficientemente alta. Debido a que en este trabajo se utilizan con datos trimestrales y no anuales como el trabajo recién citado, se utilizarán cuatro años de rezago, es decir, 16 trimestres.

En cuanto a las normas climáticas, la literatura (Arguez et al 2012; Vose et al 2012) señala que las normas climáticas son generalmente computadas usando un promedio móvil

de 30 años¹⁴. Así, la norma histórica se calcula como sigue:

$$T^*_{r,q,y} = \frac{1}{30} \sum_{l=1}^{30} T_{r,q,y-l+1}, \quad (11)$$

$$P^*_{r,q,y} = \frac{1}{30} \sum_{l=1}^{30} P_{r,q,y-l+1}. \quad (12)$$

Por último, se calculará el efecto de largo plazo del cambio climático sobre cada una de las actividades económicas del PIB a partir de los coeficientes previamente obtenidos de acuerdo a la siguiente expresión.

$$\theta = \frac{\sum_{l=0}^p \beta_l}{1 - \sum_{l=0}^p \phi_l}. \quad (13)$$

Como ejercicios adicionales, se analizará primero si existen efectos heterogéneos del cambio climático en la actividad económica según cada estación del año. Para realizar esto se agregan variables *dummies* que interactúan con el vector de variables climáticas Δx en la Ecuación (8) de la siguiente manera.

$$\Delta y_{r,q,y} = \alpha_r + \sum_{l=1}^p \phi_l \Delta y_{r,q,y-l} + \sum_{i=0}^p \beta_i \Delta x_{r,q,y-l} + \sum_{i=0}^p \gamma_i \Delta x_{r,q,y-l} * dummy_{estación} + \delta dummy_{estación} + \varepsilon_{r,q,y}, \quad (14)$$

$Dummy_{invierno}$ toma el valor 1 en el tercer trimestre (jul-ago-sep) y 0 en el resto de trimestres; $dummy_{verano}$ toma el valor 1 en el primer trimestre (ene-feb-mar) y 0 en el resto de trimestres; $dummy_{otoño}$ toma el valor 1 en el segundo trimestre (abr-may-jun) y 0 en el resto de trimestres; y $dummy_{primavera}$ toma el valor 1 en el cuarto trimestre (oct-nov-di) y 0 en el resto de trimestres.

Por último, se analizará si los efectos de una mayor temperatura y menor precipitación en la actividad económica se ven exacerbados o no en situaciones de olas de calor y de sequía.

¹⁴Como ejercicios de robustez se realizarán estimaciones con distintas ventanas de tiempo.

En Chile, la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) clasifica como olas de calor aquellos eventos en que la temperatura máxima supera un valor crítico (umbral) por al menos tres días. Por su parte, la sequía se define, según el Centro UC Cambio Global, como un periodo de condiciones anormalmente secas durante suficiente tiempo para causar un desequilibrio hidrológico grave. En este trabajo definiremos el umbral para la temperatura como el número de días dentro de un trimestre en que la temperatura máxima sobrepasa por al menos 1 desviación estándar su promedio histórico¹⁵. Con respecto a la sequía, para efectos de este trabajo se utilizará el número de días dentro de un trimestre donde la precipitación es igual a cero. La ecuación a estimar para este ejercicio es la siguiente:

$$\Delta y_{r,q,y} = \alpha_r + \sum_{l=1}^p \phi_l \Delta y_{r,q,y-l} + \sum_{i=0}^p \beta_i \Delta x_{r,q,y-l} + \sum_{i=0}^p \delta_i \Delta x_{r,q,y-l} * \text{días} + \gamma \text{días} + \varepsilon_{r,q,y}, \quad (15)$$

Se estima la ecuación por separado para temperatura y precipitación. *Días* corresponde a la cantidad de días dentro de un trimestre donde la temperatura y precipitación superan los umbrales antes descrito.

6. Resultados

En el Cuadro 7 se muestra el resultado para los efectos de largo plazo del cambio climático para cada una de las actividades económicas del PIB, es decir, los coeficientes mostrados corresponden al θ de la Ecuación (13) presentada en la sección anterior. En las columnas (1) y (2) se muestran los coeficientes de la estimación incluyendo tanto temperatura como precipitación en la Ecuación (13), mientras que las columnas (3) y (4) se muestran los coeficientes de la estimación que incluye temperatura y precipitación por separado.

Se observa que, en general, los coeficientes tienen el signo esperado. Es decir, un aumento de la temperatura respecto a su norma histórica se relaciona de manera negativa con el

¹⁵El promedio histórico se calcula como un promedio móvil de 30 años por región y mes.

Cuadro 7: Impacto del Cambio Climático en el PIB de Chile

Sector	T	P	T	P
	(1)	(2)	(3)	(4)
Agropecuario-silvícola	-0.81**	-0.20**	-0.93**	-0.24**
Pesca	-0.61**	0.26**	-0.19	0.25**
Minería	-0.22	0.28**	0.00	0.27**
Manufacturas	-0.51*	0.16**	-0.33*	0.15*
Electricidad, gas, agua y gestión de desechos	0.15	0.23**	0.34	0.26**
Construcción	-0.21	0.19**	-0.04	0.18**
Comercio, restaurantes y hoteles	-0.81***	0.00	-0.73**	-0.02
Transporte, información y comunicaciones	-0.89***	0.13	-0.79**	0.08
Servicios financieros y empresariales	-1.28***	-0.10	-1.40***	-0.17
Servicios de vivienda e inmobiliarios	-0.47**	0.22**	-0.23	0.21**
Servicios personales	-0.18	0.31***	0.09	0.32***
Administración pública	-0.27	0.21**	-0.03	0.21**
Rezagos PIB, T y P	4	4	4	4
T y P por separado			X	X
Observaciones	975	975	975	975
Efecto en el PIB Total	-0.48	0.14	-0.42	0.14

Notas: Esta tabla muestra los resultados de la estimación de la Ecuación (8) donde la variable dependiente es el crecimiento anual del PIB de Chile durante 1997 hasta 2019 de cada una de las industrias, medido en puntos porcentuales. Los coeficientes muestran el impacto de un aumento de 0,2°C de la temperatura respecto a su norma histórica, y de una caída de -12,2 milímetro en la precipitación respecto de su norma histórica. Estimación controla por efecto fijo por región y errores estándar estimados con metodología Newey-West para tratar la autocorrelación y heterocedasticidad de los errores. El efecto en el PIB total se calculó ponderando los coeficientes de cada sector según la participación de cada sector en el PIB total (ver Cuadro 1 del texto). Aquellos coeficientes que no son estadísticamente significativos se asume que son cero. Niveles de significancia: *** $p < 0.01$; ** $p < 0.05$; * $p < 0.1$.

crecimiento del PIB, donde el efecto es significativo en industrias tales como Agropecuario-silvícola; Comercio, restaurantes y hoteles, entre otros donde en estos sectores un aumento de 0,2 grados Celcius de la temperatura media respecto de su norma histórica tiene un efecto de -0,81 puntos porcentuales en el crecimiento interanual trimestral de ambos sectores anteriormente mencionados. Con la precipitación se observa un resultado distinto, donde caídas en la precipitación respecto a su norma histórica no necesariamente tiene un efecto negativo en todas las industrias del PIB de Chile. Es más, la mayoría de los coeficientes tienen el signo contrario. De todas formas, destaca el resultado en el sector Agropecuario-Agrícola, donde una menor precipitación se relaciona de manera negativa y significativa con

la actividad, donde una caída de -12,2 milímetros en la precipitación media respecto de su norma histórica tiene un impacto de -0,20 puntos porcentuales en el crecimiento interanual trimestral de este sector¹⁶.

Adicionalmente, del Cuadro 7 se puede observar que los resultados son robustos a incluir tanto las variables de temperatura y precipitación juntas (columnas 1 y 2) como por separado (columnas 3 y 4), donde en general, los coeficientes mantienen su signo, su magnitud no cambia de manera significativa, al igual que la significancia.

En el Apéndice 4 de este trabajo se muestran distintos ejercicios de robustez de la estimación recién presentada. Los primeros ejercicios realizan la misma estimación pero cambiando la ventana móvil de la norma histórica desde 30 años a 20 y 40 años, y se observa que los resultados son robustos a la elección de la ventana. Además, se realiza la misma estimación presentada en el Cuadro 7 pero utilizando datos de temperatura y precipitación desde la Aeronáutica Civil¹⁷ y también se observa que los resultados se mantienen independiente de la fuente de datos.

6.1. Efectos Heterogéneos por Estación del Año

En el Cuadro 8, se muestran los resultados de estimar la Ecuación (14). Particularmente se muestran los efectos de largo plazo de los coeficientes γ_i . Se observa que en invierno y verano, columnas (2) y (4), una menor precipitación respecto de su norma histórica se relaciona de manera negativa con la actividad en todas las industrias, y destaca que en los meses de verano, la relación es significativamente distinta de cero en la mayoría de las industrias. Para

¹⁶Para el sector Agrícola se realizó un ejercicio de robustez adicional, donde se eligieron los rezagos de PIB, Temperatura y Precipitación según el óptimo desde los datos (en vez de usar 4 años de rezago). Dado que para cada región la cantidad de rezagos es distinta, el criterio fue elegir la máxima cantidad de rezagos del total de regiones. Así, se escogió 3 rezagos para el PIB, 2 rezagos para la Temperatura y ningún rezago para la Precipitación. Los resultados encontrados son robustos a los que se muestran en el Cuadro 7, donde un aumento de 0,2°C de la temperatura respecto de su norma histórica tiene un impacto de -0,83** puntos en el crecimiento del PIB, y una caída de 12,2 milímetros de la precipitación respecto de su norma histórica tiene un impacto de -0,21*** puntos en el crecimiento del PIB

¹⁷Dado que estos datos estaban incompletos para algunas regiones, utilizando datos desde el Banco Mundial se estimó mediante una regresión lineal la relación entre los datos del Banco Mundial y la Aeronáutica Civil, y en base a esta relación se predijeron aquellos datos faltantes. Adicionalmente, para la región que no cuenta datos desde la Aeronáutica Civil (región VI) se utilizaron los del Banco Mundial

el sector Agropecuario-silvícola destaca que el coeficiente asociado al cambio de precipitación alcanza su mayor valor (en valor absoluto) cuando se está en los meses de verano, donde una caída de -12,2 milímetros en la precipitación respecto de su norma histórica tiene un impacto en el crecimiento del sector de -1,38 puntos porcentuales, sugiriendo así que la escasez de lluvia en verano tiene un impacto significativo en el sector.

Con la temperatura hay menos consistencia en cuanto a signo y significancia a través de las distintas industrias y a lo largo de las estaciones del año, donde no en todas las estaciones se observa que un aumento de la temperatura respecto de su norma histórica se relaciona de manera negativa con la actividad. Para el sector Agropecuario-Silvícola, por ejemplo, se observa que durante el invierno la temperatura se relaciona de manera positiva con la actividad, lo que sugiere que el sector se beneficia de mayores temperaturas en los meses de invierno. En tanto, para el sector Comercio, restaurantes y hoteles se observa que en los meses de invierno un aumento de temperatura tiene efectos negativos en la actividad, lo que podría estar relacionado con la temporada de nieve (la que se beneficia de temperaturas bajas).

Otro elemento a destacar del Cuadro 8 tiene que ver con que en los meses de otoño el coeficiente asociado a la precipitación tiene signo positivo, lo que indica que una caída en la precipitación respecto de su norma histórica tiene un efecto positivo en la actividad del sector durante los meses de otoño. Esto podría deberse a que el trigo (mayor producción del agro en Chile según información que entrega la ODEPA) se siembra en los meses de mayo y junio, sugiriendo que el exceso de lluvia en los meses de siembra podría no ser óptimo y afectar negativamente el crecimiento del sector.

Por último, destaca que durante los meses de verano, los coeficientes asociados a la temperatura alcanzan el mayor valor (en valor absoluto), lo que indica que en el verano, un aumento de la temperatura respecto de su norma histórica, tiene un mayor impacto negativo en el PIB relativo al resto de las estaciones del año. Este resultado conversa con resultados encontrados por Colacito et al (2019), quienes encuentran que para Estados Unidos el efecto

de un aumento de la temperatura promedio es particularmente elevado en los meses de verano.

Cuadro 8: Resultados estimación: impacto del cambio climático en el PIB de Chile (periodo 1997-2019) utilizando dummies por estación

	Invierno		Verano		Otoño		Primavera	
	T	P	T	P	T	P	T	P
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Agropecuario-silvícola	0.96**	-0.29*	-1.38**	-0.79**	-1.04**	0.42**	0.98**	-0.06
Pesca	-0.03	-0.41**	-1.17**	-0.73**	0.58	0.39	0.65**	0.11
Minería	0.01	0.00	-1.58**	-0.89**	0.79	0.27*	0.10	-0.06
Manufacturas	-0.43	-0.15	-0.31	-0.53*	0.32	0.34**	0.25	-0.22
Electricidad, gas, agua y gestión de desechos	-0.76	-0.40**	-0.59	-0.57	1.44***	0.27	0.16	0.45**
Construcción	-0.53**	-0.01	0.45	-0.39	0.14	0.23**	0.29	-0.18
Comercio, restaurantes y hoteles	-0.43*	-0.12	0.05	-0.52**	-0.20	0.37**	0.45	-0.39**
Transporte, información y comunicaciones	-0.22	-0.16	-1.28**	-0.88**	-0.11	0.38**	1.29**	-0.14
Servicios financieros y empresariales	0.32	-0.17	-0.66	-0.81**	-1.14*	0.46**	0.84	-0.35
Servicios de vivienda e inmobiliarios	-0.39	-0.10	-1.00	-0.76**	0.63	0.34**	0.41	-0.18
Servicios personales	-0.41	-0.11	-0.07	-0.26	0.52	0.23	-0.12	-0.17
Administración pública	-0.29	-0.14	-0.61*	-0.49	0.46	0.31**	0.30	-0.14
Rezagos PIB, T y P	4	4	4	4	4	4	4	4
T y P por separado	X	X	X	X	X	X	X	X
Observaciones	975	975	975	975	975	975	975	975
Efecto en el PIB total	-0.05	-0.03	-0.42	-0.54	-0.15	0.29	0.14	-0.02

Notas: Esta tabla muestra los resultados de la estimación de la Ecuación (8) donde la variable dependiente es el crecimiento anual del PIB de Chile de cada una de las industrias, medido en puntos porcentuales. Los coeficientes muestran el impacto de un aumento de 0,2°C de la temperatura respecto a su norma histórica, y de una caída de 12,2 milímetro en la precipitación respecto de su norma histórica. Se presentan los efectos marginales de efecto del cambio climático en cada estación del año. Estimación controla por efecto fijo por región y errores estándar estimados con metodología Newey-West para tratar la autocorrelación y heterocedasticidad de los errores. El efecto en el PIB total se calculó ponderando los coeficientes de cada sector según la participación de cada sector en el PIB total (ver Cuadro 1 del texto). Aquellos coeficientes que no son estadísticamente significativos se asume que son cero. Niveles de significancia: *** $p < 0.01$; ** $p < 0.05$; * $p < 0.1$.

6.2. Temperaturas Máximas y Mínimas

El Cuadro 9 muestra los resultados de estimar la Ecuación 8 utilizando desvíos de la temperatura máxima respecto de su norma histórica, controlando también por los desvíos de la precipitación media respecto de su norma histórica, aunque estos coeficientes no se reportan en la tabla. En la columna (1) se observa que, a diferencia de lo que se observa en el Cuadro 8 donde se utilizan temperaturas medias, al usar temperaturas máximas todos los coeficientes son negativos y significativos, sugiriendo que mayores temperaturas máximas respecto de su

norma histórica se relaciona de manera negativa y significativa con la actividad, lo que es cierto para todas las industrias¹⁸.

Con respecto a la temperatura mínima, los resultados se observan en la columna (2). Se observa que aumentos de la temperatura mínima respecto de su norma histórica se relacionan de manera negativa con la actividad, pero estos resultados no son estadísticamente significativos.

Cuadro 9: Impacto del cambio climático en el PIB de Chile (periodo 1997-2019) utilizando temperaturas máximas y mínimas

	Temperaturas máximas	Temperaturas mínimas
	(1)	(2)
Agropecuario-silvícola	-0.38**	-0.15
Pesca	-0.48**	-0.10
Minería	-0.50**	-0.11
Manufacturas	-0.41**	-0.14*
Electricidad, gas, agua y gestión de desechos	-0.49***	-0.13
Construcción	-0.35**	-0.07
Comercio, restaurantes y hoteles	-0.42**	-0.20**
Transporte, información y comunicaciones	-0.52*	-0.20*
Servicios financieros y empresariales	-0.48**	-0.21
Servicios de vivienda e inmobiliarios	-0.44**	-0.14
Servicios personales	-0.40**	-0.09
Administración pública	-0.46**	-0.13
Rezagos PIB, T y P	4	4
T y P por separado	X	X
Observaciones	752	752
Efecto en el PIB total	-0.46	-0.06

Notas: Esta tabla muestra los resultados de la estimación de la Ecuación (15) donde la variable dependiente es el crecimiento anual del PIB de Chile de cada una de las industrias, medido en puntos porcentuales. Los coeficientes de la muestran el impacto de un aumento de 0,2°C de la temperatura máxima y mínima, cada una estimada por separado, en el crecimiento interanual de la actividad económica en cada una de las 12 industrias del PIB de Chile. Estimación controla por efecto fijo por región y errores estándar estimados con metodología Newey-West para tratar la autocorrelación y heterocedasticidad de los errores. El efecto en el PIB total se calculó ponderando los coeficientes de cada sector según la participación de cada sector en el PIB total (ver Cuadro 1 del texto). Aquellos coeficientes que no son estadísticamente significativos se asume que son cero. Niveles de significancia: *** $p < 0.01$; ** $p < 0.05$; * $p < 0.1$.

¹⁸Cabe destacar, no obstante, que los resultados no son del todo comparables debido que acá se excluyen las regiones I, III y VI.

6.3. Temperaturas máximas y sequía: cantidad de días dentro de un trimestre donde la temperatura supera cierto umbral y la precipitación es cero

Los resultados de estimar la Ecuación (15) se observan en el Cuadro 10. En la columna (1) se muestran los coeficientes asociados a la interacción de los desvíos de la temperatura máxima respecto de su norma histórica con el número de días dentro de un trimestre donde la temperatura supera el umbral descrito en la sección de la Metodología, es decir, el coeficiente δ_t de la Ecuación (15). Los coeficientes de esta columna fueron ajustados por la desviación promedio de la temperatura respecto de su norma histórica (0,2°C) y multiplicados por 3, para tener una idea del efecto que tiene tener al menos tres días dentro de un trimestre con temperaturas extremas (sobre el umbral). Se observa que la gran mayoría de los coeficientes tienen signo negativo, siendo varios de estos significativos. El resultado para el sector Agropecuario-silvícola significa que un aumento de 0,2°C de la temperatura máxima respecto de su norma histórica, y que esto ocurrió por 3 días en un trimestre, tiene un impacto de -0,02 puntos porcentuales en el crecimiento interanual del sector¹⁹. Con respecto a la precipitación, los resultados se observan en la columna (2). Al igual que en el Cuadro 7, la mayoría de los coeficientes no tienen el signo esperado, pero vuelve a destacar el resultado en el sector Agropecuario-silvícola, donde una caída de -12,2 milímetros de la precipitación respecto de su norma histórica en un trimestre donde hay 60 días sin lluvia, tiene un impacto adicional en el crecimiento de -0,01 puntos porcentuales. Esto sugiere que la sequía exagera los efectos del cambio climático en la actividad del sector.

Este resultado refuerza los encontrados anteriormente al encontrar una relación negativa entre el cambio climático y la actividad económica.

¹⁹Cabe destacar que como se mencionó, este resultado corresponde al coeficiente asociado a la interacción entre las variables, no al efecto total.

Cuadro 10: Impacto del cambio climático en el PIB de Chile (periodo 1997-2019) olas de calor y sequía

	Temperatura	Precipitación
	(1)	(2)
Agropecuaria-silvícola	-0.02**	-0.01*
Pesca	0.00	0.01**
Minería	-0.02**	0.01**
Manufacturas	-0.01	0.01**
Electricidad, gas, agua y gestión de desechos	-0.02	0.01**
Construcción	-0.01	0.00
Comercio, restaurantes y hoteles	-0.01	0.00
Transporte, información y comunicaciones	-0.02**	0.01
Servicios financieros y empresariales	-0.02**	0.00
Servicios de vivienda e inmobiliarios	-0.02**	0.01**
Servicios personales	-0.01	0.01***
Administración pública	-0.02*	0.01**
Rezagos PIB, T y P	4	4
T y P por separado	X	X
Observaciones	737	752
Efecto en el PIB total	-0.01	0.01

Notas: Esta tabla muestra los resultados de la estimación de la Ecuación (15) donde la variable dependiente es el crecimiento anual del PIB de Chile de cada una de las industrias, medido en puntos porcentuales. Los coeficientes de la columna (1) muestran el impacto de un aumento de 0,2°C de la temperatura máxima interactuado con el número de días donde la temperatura supera por 1 desviación estándar su promedio histórico por 3 días. Los coeficientes de la columna (2) muestran el impacto de una caída de -12,2 milímetros en la precipitación interactuado con el número de días dentro de un trimestre donde la precipitación total es cero por 60 días. Estimación controla por efecto fijo por región y errores estándar estimados con metodología Newey-West para tratar la autocorrelación y heterocedasticidad de los errores. El efecto en el PIB total se calculó ponderando los coeficientes de cada sector según la participación de cada sector en el PIB total (ver Cuadro 1 del texto). Aquellos coeficientes que no son estadísticamente significativos se asume que son cero. Niveles de significancia: *** $p < 0.01$; ** $p < 0.05$; * $p < 0.1$.

7. Conclusión

El cambio climático, tanto en el mundo como en Chile, es una realidad: la temperatura está aumentando y la precipitación disminuyendo. Dada la relación negativa que se ha estudiado que existe entre el cambio climático y el PIB, este trabajo estudia esta relación a través de un panel regional e industrial para Chile entre el primer trimestre de 1997 y cuarto trimestre de 2019. Los resultados muestran que el cambio climático tiene efectos negativos

sobre el PIB. Específicamente, un aumento de la temperatura tiene un impacto negativo y significativo en la actividad económica para la gran mayoría de las industrias del PIB de Chile. Con respecto a la precipitación, se encuentra que una caída en la precipitación afecta negativamente la actividad sólo en la industria Agropecuaria-silvícola, revelando la heterogeneidad en los impactos que el cambio climático puede generar en la economía chilena. Estimaciones adicionales con temperaturas máximas y mínimas indican que los efectos negativos en el PIB están asociados a incrementos en la temperatura máxima, mientras que los efectos en el aumento de la temperatura mínima son menos evidentes. Por último, se encuentra que las olas de calor y épocas de sequía, exacerbaban los resultados mencionados anteriormente.

Este trabajo se une a la literatura ya existente que ha encontrado efectos negativos del cambio climático sobre la actividad económica, lo cual incentiva a indagar más en políticas que puedan ayudar a mitigar los efectos del cambio climático. Por ejemplo, algunas industrias podrían realizar inversiones que ayuden a mitigar los efectos del cambio climático (Olmstead et al, 2011), por lo que es clave entender cuáles industrias son las más afectadas por este fenómeno para concentrar los esfuerzos allí.

Por último, este trabajo tiene algunas limitaciones. La primera es que el modelo que se estima es un modelo de forma reducida, no es un modelo de equilibrio general. Por lo tanto, no incorpora retroalimentación entre la actividad económica y el cambio climático. La segunda limitación tiene que ver con la no incorporación de la probabilidad de ocurrencia de eventos catastróficos, que los de incorporarse, probablemente tengan efectos mucho más significativos en el PIB, por ejemplo, si se considerara una sequía total, derretimiento de glaciares; eventos que sin duda, podrían ser devastadores en ciertas zonas y sectores de la economía. Además, si bien se explican los mecanismos por los cuales el cambio climático tiene un impacto en la actividad económica, no se detiene a explicar cada mecanismo en las industrias del PIB de Chile, lo que podría ser interesante para futuros trabajos. Adicionalmente, un trabajo futuro

podría ser identificar los efectos del cambio climático para cada una de las regiones del país-

8. Bibliografía

Arguez, A., Durre, I., Applequist, S., Vose, R.S., Squires, M.F., Yin, X., Heim, R.R., Owen, T.W., 2012. *Noaa's 1981-2010 U.S climate normals: An overview*. Bulletin of the American Meteorological Society, 93 (11), 1687-1697.

Banco Central de Chile, 2022. Base de Datos Estadísticos: Producto interno bruto por actividad económica, volumen a precios año anterior encadenado, series empalmadas, referencia 2018 (miles de millones de pesos encadenados). Frecuencia trimestral.

Banco Central de Chile, 2022. Base de Datos Estadísticos: Producto interno bruto regional, PIB por actividad, precios corrientes, series empalmadas (miles de millones de pesos). Frecuencia anual. Se descargan desde referencia 1996 hasta 2013 para 13 regiones de Chile (I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII y RM).

Banco Mundial, 2022. *World Bank Group, Climate Change Knowledge Portal. Country profiles: Chile. Climate projections, mean projections (CMIP6). Projected Mean-Temperature Chile; (Ref. Period: 1995-2014), Multi-Model Ensemble.*

Banco Mundial, 2022. *World Bank Group, Climate Change Knowledge Portal. Country profiles: Chile. Climate projections, mean projections (CMIP6). Projected Precipitation Chile; (Ref. Period: 1995-2014), Multi-Model Ensemble.*

Banco Mundial, 2022. *World Bank Group, Climate Change Knowledge Portal. Time-series, CRU (observed) Mean-Temperature, monthly, Country+Sub-national units, Chile, 1901-2021.*

Banco Mundial, 2022. *World Bank Group, Climate Change Knowledge Portal. Time-series, CRU (observed) Precipitation, monthly, Country+Sub-national units, Chile, 1901-2021.*

Batten, S., 2018. *Climate change and the macro-economy: a critical review*. Bank of England working papers 706, Bank of England.

Burke, M., Hsiang, S.M., Miguel, E., 2015. *Global non-linear effect of temperature on economic production*. *Nature* 527, 235-239.

Colacito, R., Hoffmann, B., Pjan T., 2019. *Temperature and Growth: A Panel Analysis of the United States*. *Journal of Money, Credit and Banking*, 51(2-3), 313-368.

Dietz, S., Stern, N., 2015. *Endogenous growth, convexity of damage and climate risk: How Nordhaus' framework supports deep cuts in carbon emissions*. *The Economic Journal*, 125: 574-620.

IMF, 2017. *The effects of weather shocks on economic activity: How can low-income countries cope?*. *World Economic Outlook*, October 2017. Chapter 3, 117-183.

IPCC, 2021. *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press,

Hernandez, K., Madeira, C., 2022. *The impact of climate change on economic output across industries in Chile*. *PLoS ONE* 17(4): e0266811.

Kahn M., Mohaddes K., Ng R., Hashem Pesaran M., Raissi M., Yang J., 2021. *Long-Term Macroeconomic Effects of Climate Change: A Cross-Country Analysis*. *Energy Economics*, Elsevier, vol. 104, p. 105624.

OECD, 2015. *The Economic Consequences of Climate Change*. OECD Publishing, Paris.

Olmstead, A. L., Rhode, P. W., 2011. *Adapting North American wheat production to*

climatic challenges, 1839–2009. Proceedings of the National Academy of sciences, 108(2), 480-485.

Roson, R., Sartori, M., 2016. *Estimation of Climate Change Damage Functions for 140 Regions in the GTAP 9 Database*. Journal of Global Economic Analysis, Center for Global Trade Analysis, Department of Agricultural Economics, Purdue University, vol. 1(2), pages 78-115, December.

Vose, R.S., Applequist, S., Squires, M., Durre, I., Menne, M.J., Williams, C.N., Fenimore, C., Gleason, K., Arndt, D., 2014. *Improved historical temperature and precipitation time series for U.S. climate divisions*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53(5), 1232-1251.

Apéndice

8.1. Apéndice 1

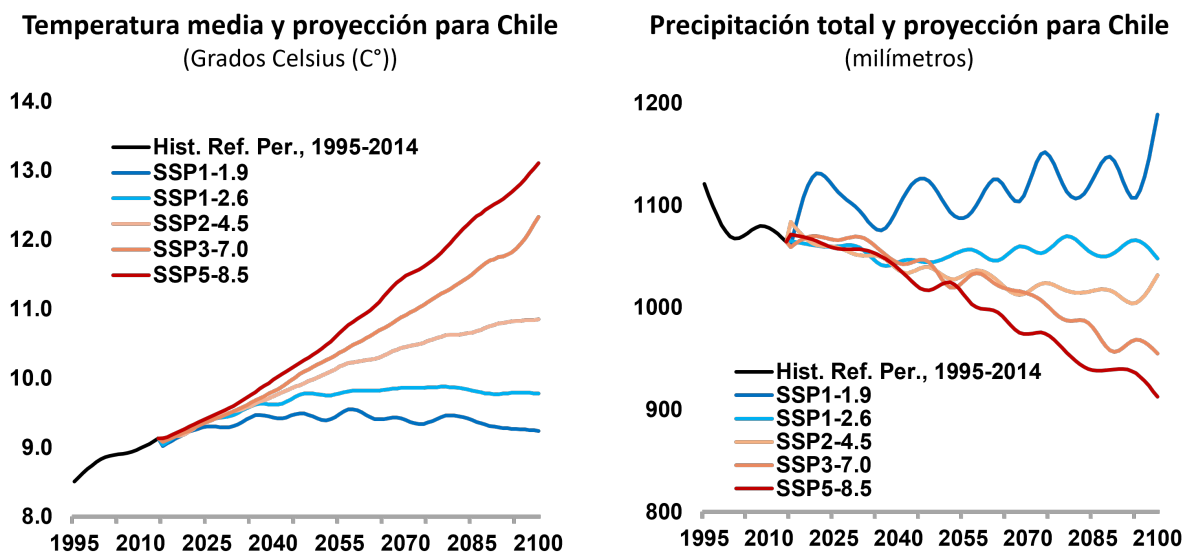


Figura 2: Cambio Climático en Chile: Proyecciones

Notas: Esta figura muestra proyecciones realizadas por el Banco Mundial en base a distintos escenarios para la temperatura (izquierda) y precipitación (derecha) en Chile hasta el año 2100. Además, se muestra la temperatura y precipitación histórica (línea negra) para el periodo 1995-2014. Proyecciones que realiza el Banco Mundial, donde los resultados presentados en la Figura 2 corresponde a datos de proyección climática provenientes de las compilaciones de modelos climáticos globales del CMIP (Coupled Model Inter-comparison Projects). Los escenarios del IPCC son escenarios SSPs (Shared Socioeconomic Pathways) que proporcionan información sobre el clima futuro en base a emisiones, esfuerzos de mitigación y las rutas de desarrollo. Estas proyecciones se realizan en base a distintos escenarios del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), donde en escenarios más catastróficos (SSP5-8.5) la temperatura media aumentaría en alrededor de 3 grados Celsius y la precipitación total anual caería en 200 milímetros hacia el año 2100 Fuente: elaboración propia en base a datos del Banco Mundial.

8.2. Apéndice 2

Cuadro 11: Tendencia en el crecimiento anual del PIB, temperatura y precipitación para 13 regiones de Chile

	I	II	III	IV	RM	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Agropecuaria-silvícola	-0.10**	-0.14**	-0.09**	-0.13***	-0.09**	-0.09**	-0.03	-0.05	0.01	-0.03	-0.05	-0.04	-0.06**
Pesca	-0.01	-0.03	0.01	-0.02	0.00	0.00	0.04	0.03	0.07	0.06	0.06	0.05	0.03
Minería	-0.09**	-0.12**	-0.09**	-0.11**	-0.08**	-0.06**	-0.01	-0.04	0.01	-0.01	-0.04	-0.02	-0.05**
Manufacturas	-0.05	-0.07**	-0.03	-0.05*	-0.02	-0.02	0.03	0.01	0.07**	0.03	0.02	0.02	0.00
Electricidad, gas, agua y gestión de desechos	0.03	-0.00	0.03	0.02	0.03	0.05	0.09**	0.06	0.11**	0.09**	0.09*	0.06	0.07*
Construcción	0.05	0.01	0.04	0.05	0.05*	0.07**	0.11**	0.08**	0.13***	0.10**	0.11**	0.08*	0.08**
Comercio, restaurantes y hoteles	-0.05	-0.09**	-0.04	-0.07**	-0.03*	-0.03	0.02	-0.00	0.05*	0.02	0.01	0.01	-0.00
Transporte, información y comunicaciones	-0.12***	-0.15***	-0.10**	-0.15***	-0.12***	-0.11***	-0.03	-0.04*	0.00	-0.02	-0.05	-0.03	-0.08***
Servicios financieros y empresariales	-0.17***	-0.21***	-0.13***	-0.20***	-0.15***	-0.17***	-0.10***	-0.13***	-0.09***	-0.11***	-0.16***	-0.09**	-0.13***
Servicios de vivienda e inmobiliarios	-0.04	-0.07**	-0.03	-0.05**	-0.03**	-0.02	0.03	0.00	0.07**	0.03**	0.02	0.02	0.00
Servicios personales	0.02	0.00	0.02	0.02	0.02**	0.05**	0.09***	0.07***	0.13***	0.09***	0.11**	0.07**	0.06***
Administración pública	-0.02	-0.05	-0.02	-0.03	-0.00	0.00	0.05**	0.03**	0.09***	0.05***	0.05	0.03	0.03**
Temperatura	0.00	0.00***	0.00***	0.00***	0.00***	0.00***	0.00***	0.00***	0.00***	0.00***	0.00***	0.00**	0.00
Precipitación	0.00	-0.00**	-0.00**	-0.01*	-0.02*	-0.02**	-0.04**	-0.05***	-0.07***	-0.06**	-0.03**	-0.03**	-0.03**

Notas: En la tabla se reportan los coeficientes asociados a la variable de tendencia t estimados de una regresión MCO específica para 13 regiones de Chile. Para las industrias del PIB, la regresión estimada es la siguiente: $\Delta y_{i,t} = \alpha_i + \beta_i \Delta y_{i,t-4} + \gamma_i t + \epsilon_{i,t}$. Para temperatura y precipitación se estima la siguiente regresión: $X_{i,t} = \alpha_i + \gamma_i t + \epsilon_{i,t}$, donde X se refiere a temperatura y precipitación. Niveles de significancia: *** $p < 0.01$; ** $p < 0.05$; * $p < 0.1$.

8.3. Apéndice 3

Cuadro 12: Estaciones de monitoreo desde donde se obtienen datos de temperatura y precipitación desde la Aeronáutica Civil y año desde donde comienza el primer dato

Región	Año desde donde hay datos	Estación
I	Diego Aracena	1956
II	Cerro Moreno	1945
III	Desierto de Atacama	2006
IV	La Florida	1955
RM	Quinta Normal	1942
V	Santo Domingo	1967
VI	—	—
VII	General Freire	1942
VIII	Carriel Sur	1967
IX	Maquehue	1942
X	El Tepual	1964
XI	Teniente Vidal	1947
XII	Punta Arenas	1965

Notas: Esta tabla muestra el nombre de la estación de monitoreo desde donde se obtuvieron los datos de temperatura y precipitación para 13 regiones de Chile desde la Aeronáutica Civil. Además, se muestra el año desde donde comienzan los datos para cada región. Fuente: elaboración propia en base a datos de la Aeronáutica Civil.

8.4. Apéndice 4

Como se observa en los Cuadros 13 y 14, en general los resultados son robustos a utilizar distintas ventanas móviles para las normas históricas, donde se aprecia que tanto las magnitudes, signos y significancia de los coeficientes se mantienen relativamente estables en cada especificación. Adicionalmente, en el Cuadro 15 se realiza la misma estimación del Cuadro 7 pero utilizando datos de temperatura y precipitación desde la Aeronáutica Civil, y también se observa que los resultados se mantienen.

Cuadro 13: Impacto del Cambio Climático en el PIB de Chile: ejercicio de robustez con ventana móvil de 20 años

Sector	T	P	T	P
	(1)	(2)	(3)	(4)
Agropecuario-silvícola	-0.97***	-0.18*	-1.03***	-0.25**
Pesca	-0.76**	0.33***	-0.63**	0.30**
Minería	-0.38	0.36***	-0.12	0.34**
Manufacturas	-0.64**	0.21**	-0.52**	0.17**
Electricidad, gas, agua y gestión de desechos	0.14	0.28**	0.28	0.31**
Construcción	-0.29	0.24**	-0.17	0.21**
Comercio, restaurantes y hoteles	-0.97***	0.03	-0.92***	-0.02
Transporte, información y comunicaciones	-1.15***	0.19*	-1.01***	0.11
Servicios financieros y empresariales	-1.59***	-0.05	-1.56***	-0.16
Servicios de vivienda e inmobiliarios	-0.65**	0.29**	-0.48**	0.25**
Servicios personales	-0.24	0.37***	-0.05	0.36***
Administración pública	-0.40*	0.27**	-0.23	0.25**
Rezagos PIB, T y P	4	4	4	4
T y P por separado			X	X
Observaciones	975	975	975	975

Notas: Esta tabla muestra los resultados de la estimación de la Ecuación (8) donde la variable dependiente es el crecimiento anual del PIB de Chile durante 1997 hasta 2019 de cada una de las industrias, medido en puntos porcentuales. Los coeficientes muestran el impacto de un aumento de 0,2°C de la temperatura respecto a su norma histórica, y de una caída de -12,2 milímetro en la precipitación respecto de su norma histórica. Estimación controla por efecto fijo por región y errores estándar estimados con metodología Newey-West para tratar la autocorrelación y heterocedasticidad de los errores. Niveles de significancia: *** $p < 0.01$; ** $p < 0.05$; * $p < 0.1$.

Cuadro 14: Impacto del Cambio Climático en el PIB de Chile: ejercicio de robustez con ventana móvil de 40 años

Sector	T	P	T	P
	(1)	(2)	(3)	(4)
Agropecuario-silvícola	-0.80**	-0.20**	-0.86**	-0.26**
Pesca	-0.66**	0.28**	-0.56**	0.25**
Minería	-0.25	0.30**	-0.05	0.29**
Manufacturas	-0.51**	0.16**	-0.41**	0.14*
Electricidad, gas, agua y gestión de desechos	0.14	0.25**	0.26	0.29**
Construcción	-0.20	0.20**	-0.11	0.19**
Comercio, restaurantes y hoteles	-0.78***	-0.01	-0.75***	-0.04
Transporte, información y comunicaciones	-0.90***	0.12	-0.80***	0.06
Servicios financieros y empresariales	-1.27***	-0.13	-1.28***	-0.21*
Servicios de vivienda e inmobiliarios	-0.50**	0.23**	-0.37**	0.21**
Servicios personales	-0.17	0.32***	-0.01	0.33***
Administración pública	-0.27	0.22**	-0.14	0.21**
Rezagos PIB, T y P	4	4	4	4
T y P por separado			X	X
Observaciones	975	975	975	975

Notas: Esta tabla muestra los resultados de la estimación de la Ecuación (8) donde la variable dependiente es el crecimiento anual del PIB de Chile durante 1997 hasta 2019 de cada una de las industrias, medido en puntos porcentuales. Los coeficientes muestran el impacto de un aumento de 0,2°C de la temperatura respecto a su norma histórica, y de una caída de -12,2 milímetro en la precipitación respecto de su norma histórica. Estimación controla por efecto fijo por región y errores estándar estimados con metodología Newey-West para tratar la autocorrelación y heterocedasticidad de los errores. Niveles de significancia: *** $p < 0.01$; ** $p < 0.05$; * $p < 0.1$.

Cuadro 15: Impacto del Cambio Climático en el PIB de Chile: ejercicio de robustez usando datos aeronáutica

Sector	T	P	T	P
	(1)	(2)	(3)	(4)
Agropecuario-silvícola	-0.90**	-0.30**	0.95**	-0.36**
Pesca	-0.54	0.27**	-0.48	0.25
Minería	-0.23	0.28***	-0.08	0.27**
Manufacturas	-0.53	0.14**	-0.46	0.12
Electricidad, gas, agua y gestión de desechos	0.16	0.24*	0.25**	0.27***
Construcción	-0.17	0.18**	-0.11	0.16**
Comercio, restaurantes y hoteles	-0.87**	-0.04	-0.85**	-0.10
Transporte, información y comunicaciones	-0.96**	0.09	-0.88**	0.02
Servicios financieros y empresariales	-1.41***	-0.20**	-1.42***	-0.30**
Servicios de vivienda e inmobiliarios	-0.49	0.23**	-0.39	0.20**
Servicios personales	-0.17	0.34***	-0.05*	0.34***
Administración pública	-0.30	0.22**	-0.19	0.20**
Rezagos PIB, T y P	4	4	4	4
T y P por separado			X	X
Observaciones	975	975	975	975

Notas: Esta tabla muestra los resultados de la estimación de la Ecuación (8) donde la variable dependiente es el crecimiento anual del PIB de Chile durante 1997 hasta 2019 de cada una de las industrias, medido en puntos porcentuales. Los coeficientes muestran el impacto de un aumento de 1°C de la temperatura respecto a su norma histórica, y de una caída de 1 milímetro en la precipitación respecto de su norma histórica. Estimación controla por efecto fijo por región y errores estándar estimados con metodología Newey-West para tratar la autocorrelación y heterocedasticidad de los errores. Niveles de significancia: *** $p < 0.01$; ** $p < 0.05$; * $p < 0.1$.