

Estimación de los efectos de la variabilidad climática en la producción agrícola en Colombia

Estimated effects of climate variability on agricultural production in Colombia

Recepción del artículo: 04/12/2023 • Aceptación para publicación: 22/12/2023 • Publicación: 05/01/2024

<https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi21.330>

Sioux Fanny Melo León
Germán David Romero Otálora
Diego Alejandro Buitrago
Leidy Caterine Riveros
Carolina Díaz Giraldo

Departamento Nacional de Planeación. Bogotá D.C, Colombia.

Santiago A. Roa-Ortiz*

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA. Centro de Investigación. Tibaitatá. Mosquera-Cundinamarca, Colombia.

*Autor para correspondencia: sroa@agrosavia.co

Resumen

El presente documento tiene como objetivos evaluar el impacto de la variabilidad climática sobre la producción agrícola en Colombia e identificar la efectividad de los distritos de riego como medida de adaptación. Para el análisis, se utilizó un panel de datos multidimensional con efectos aleatorios con el fin de estimar el efecto sobre los cultivos reportados en 1.101 municipios colombianos, entre 2007 y 2017. Como choques climáticos se tomaron dos variables: la suma de las diferencias absolutas en la precipitación mensual frente a su media histórica y la media de las diferencias en la temperatura mensual con respecto a su promedio histórico. Como variable de adaptabilidad se usó la interacción entre los distritos de riego y nivel de lluvias. Los resultados indican que el modelo de panel de datos tridimensional presentado en este documento mostró una gran aplicabilidad a pesar de su bajo uso y el reducido número de documentos que existen sobre los efectos climáticos en la producción agrícola. Las principales conclusiones son que los aumentos de temperatura generan disminuciones en la producción agrícola y que los distritos de riego como medida de adaptación a la variabilidad climática parecen no tener un impacto significativo para contrarrestarla. Se encontró que prácticas como el uso de sombríos podrían influir en la reducción de temperaturas localmente. De igual manera, es necesario analizar el impacto de medidas que mitiguen los efectos asociados a cambios en la temperatura más que a los relacionados al régimen de precipitación.

Palabras clave: Economía agrícola, adaptación climática, distritos de riego, panel de datos multidimensional.

Abstract

The objectives of this document are to assess the impact of climate variability on agricultural production in Colombia and identify the effectiveness of irrigation districts as an adaptation measure. For the analysis, a panel of multidimensional data with random effects was used to estimate the effect on crops reported in 1,101 Colombian municipalities, between 2007 and 2017. Two variables were taken as climatic shocks: the sum of the absolute differences in the monthly precipitation compared to its historical mean and the average of the differences in the monthly temperature with respect to its historical average. The interaction between irrigation districts and rainfall levels was used as an adaptability variable. The results indicate that the three-dimensional data panel model presented in this paper showed great applicability despite its low use and the small number of documents that exist on climate effects on agricultural production. The main conclusions are that temperature increases lead to decreases in agricultural production and that irrigation districts as a measure of adaptation to climate variability do not appear to have a significant impact to counteract it. We found that practices such as the use of shades could influence the reduction of temperatures locally. Similarly, it is necessary to analyse the impact of measures that mitigate the effects associated with changes in temperature rather than those related to the precipitation regime.

Keywords: Agricultural economics, climate adaptation, irrigation districts, multidimensional data panel.

Introducción

El cambio climático se refiere a un cambio en el estado del clima a largo plazo que puede verificarse mediante la revisión de datos climáticos y pruebas estadísticas y que persiste durante un período de tiempo prolongado (CIIFEN, Sine Die; IPCC, 2018) a diferencia de la variabilidad climática que es un fenómeno temporal y transitorio y es atribuible directa o indirectamente a la actividad humana, ya que ha alterado la composición de la atmósfera global (IPCC, 2014; Ortiz y González, 2017). Se tiene conocimiento, sin embargo, de la posible relación entre estos dos fenómenos, en la medida en que los aumentos de temperatura asociados con el cambio climático hacen que la variabilidad climática sea más intensa y frecuente (Williams *et al.*, 2003)

A nivel internacional, durante varios años, se han elaborado análisis de los impactos climáticos, muchos de los cuales se han enfocado en identificar los cambios en el rendimiento de los cultivos causados por alteraciones en las condiciones climáticas (Mendelsohn *et al.*, 1994, 1996; Santer, 1984; Chen *et al.*, 2004; Isik y Devadoss, 2006). Asimismo, estudios recientes indican que factores climáticos como la temperatura, la precipitación y, especialmente, los choques de variabilidad climática influyen en la productividad de los cultivos, la producción ganadera y otros componentes del sistema agrícola (Tao *et al.*, 2009; Tao *et al.*, 2008; Tao *et al.*, 2003; IPCC, 2007, Adams *et al.*, 1998, 1999; Lewandrowski y Schimmelpfennig, 1999; Bryant *et al.*, 2000; McCarthy *et al.*, 2001; Polsky y Easterling, 2001).

Para Colombia, se identificó que las reducciones de producción agrícola, producto del cambio climático, pueden ser de 1.9 % a 2.8 % entre 2010 y 2100 (BID-CEPAL-DNP, 2014), con una caída de alrededor de 7.4 % en los rendimientos a nivel nacional. Del mismo modo, se evidenció que los rendimientos de muchos cultivos podrían disminuir significativamente debido a temperaturas más altas, como consecuencia, por ejemplo, del estrés térmico e hídrico, del acortamiento de la estación de crecimiento y de la mayor presencia de plagas y enfermedades (Fernández, 2013).

Según la Encuesta Nacional Agrícola (ENA) del año 2019 y la Evaluación Institucional de Pronata,

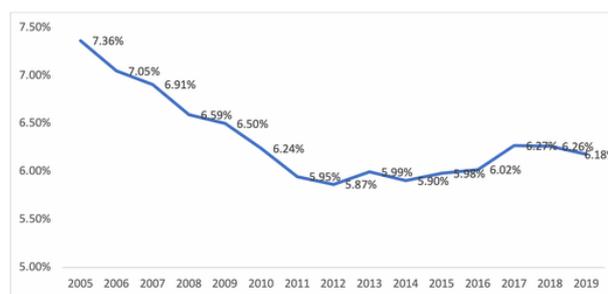


Figura 1. Participación del valor agregado agropecuario en el PIB nacional, 2005-2019. Elaboración propia de la investigación con datos del DANE (2019)

los cultivos que tienen acceso al riego en el país tienen rendimientos promedio por hectárea más altos que los cultivos sin riego, ya que este servicio ayuda a optimizar el uso de los recursos hídricos y la adaptabilidad de los cultivos frente a la variabilidad climática (DNP, 2016a).

Por lo anterior, y con el fin de aportar conocimiento que aumente la resiliencia del sector agrícola colombiano, este documento calcula el efecto de la variabilidad climática en la producción agrícola nacional para cada cultivo presente en 1.101 municipios, así como el efecto que tendría el uso de los distritos de riego como medida de adaptación a la variabilidad climática.

Contexto colombiano

El sector agrícola colombiano tiene una política de adaptación de la tierra que aborda los componentes del riego, el drenaje y la protección contra inundaciones, proporcionados a través de obras y equipos especializados en áreas llamados Distritos de Adecuación de Tierras (ADT). Reconociendo la necesidad de llevar a cabo una gestión del riesgo agrícola frente a la variabilidad y el cambio climático.

El país tiene 18,4 millones de hectáreas con aptitud agrícola con potencial para desarrollarse con ADT; sin embargo, solo 1,1 millones de hectáreas cuentan con este servicio, lo que representa una cobertura nacional del 6 % (DNP, 2018). Según el CONPES 3926 la baja cobertura se explica por las debilidades en la planificación a mediano y largo plazo de los nuevos proyectos ADT, también porque los proyectos desarrollados y construidos por el gobierno nacional ya no están en funcionamiento. Para Perfetti *et al.* (2019), el énfasis de las políticas, los

recursos invertidos y las acciones tomadas no han sido suficientes y, actualmente, el uso del riego en las actividades agrícolas está lejos de su potencial.

Por esa razón, la política de ADT fue definida en el documento CONPES 3926 “Política de Adecuación de Tierras 2018-2038” y tiene como objetivo gestionar la información para mejorar la planificación en esta área, promover la coordinación interinstitucional en temas de ADT, mejorar la efectividad y eficiencia de las inversiones y actualizar el marco legal para la implementación de la política. Dicha implementación requiere un plan de acción intersectorial para la gestión integral y eficiente de los recursos hídricos, a través de la identificación y gestión del riesgo de desastres, la variabilidad y el cambio climático.

Otro instrumento importante para mejorar la adaptabilidad del sector agrícola está relacionado con el uso de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTeI), que se manifiesta en la generación de conocimiento científico (I+D+i), en su difusión y adopción en las unidades productivas (extensión rural). De esta manera, la CTeI agrícola contribuye al aumento de la productividad sectorial y a la adaptabilidad de los productores agrícolas a los fenómenos climáticos.

Al respecto, el Gobierno Nacional estableció el Sistema Nacional de Innovación Agrícola (SNIA), compuesto por el Subsistema Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agrícola, el Subsistema Nacional de Extensión Agrícola y el Subsistema Nacional de Educación y Capacitación para la Innovación Agrícola. Este sistema es clave para la adaptabilidad al cambio climático, en la medida en que se realizan investigaciones sobre variedades resistentes al cambio climático y se lleva a cabo la transferencia de conocimientos para la adopción de buenas prácticas agrícolas (BPA) y buenas prácticas de manipulación (BPM).

Materiales y métodos

La investigación desarrollada es explicativa, aplicada y con un enfoque cuantitativo. Se utilizó un panel de datos multidimensional para el periodo comprendido entre 2007 y 2017. Este tipo de datos han sido usado en un grado menor en la literatura para realizar este tipo de ejercicios, ya que han sido utilizados modelos de regresión (Mendelsohn *et al.*

1994, 1996; Santer, 1984), de máxima verosimilitud (Chen *et al.*, 2004) y funciones de producción estocásticas (Isik y Devadoss, 2006) para analizar el impacto del cambio climático y la variabilidad climática sobre el rendimiento en los cultivos.

Un agricultor toma decisiones sobre su producción teniendo en cuenta lo que sucedió en el período anterior, en particular en lo relacionado con la producción ($Production_{ijt-1}$) y área cultivada ($AREA_{ijt-1}$). Estas variables capturan las elecciones de los productores en función del mercado, el clima o la dinámica reguladora. La lógica del productor muestra que, si obtienen buenas ganancias debido a su producción actual, el siguiente periodo buscará mantener o aumentar el área de producción con el fin de igualar o aumentar sus ingresos; de la misma manera, cuando los ingresos de su actividad productiva disminuyen, el área utilizada tiende a disminuir o cambia a otro cultivo que no le represente pérdidas económicas. Por otro lado, Just *et al.*, (2006) expone que los agricultores con mayor nivel educativo y experiencia están asociados a uso de otro tipo de información. Del mismo modo, World Bank (2009) muestra que, en países en vías de desarrollo, los agricultores hombres generalmente tienen mayor acceso a información para la toma de decisiones sobre los cultivos.

En ese sentido, la producción ($Production_{ijt}$) es una función de variables pasadas y variables directamente relacionadas con el productor, como el área utilizada en el período ($AREA_{ijt}$) y el acceso al distrito de riego ($DistRiesgo_{jt}$). Es necesario tener en cuenta en el modelo la diferencia entre cultivos transitorios y el comportamiento de los cultivos permanentes ($Permanent_{ijt}$). El clima también es importante dentro de la producción, especialmente en áreas que no tienen riego y tienen una alta dependencia de la lluvia y de la temperatura óptima.

Los productores generalmente gestionan los impactos de las estaciones lluviosas o secas, estas dejan de ser manejables por ellos cuando las magnitudes son mayores a las usuales. Para el modelo, la variabilidad climática se estimó a partir de las desviaciones de variables como la precipitación y la temperatura. Específicamente,

para establecer las variaciones de la precipitación con respecto al promedio histórico, se calculó la diferencia anual de lluvia ($D_Anual_prec_{jt}$) que acumula la diferencia mensual absoluta de lluvia con respecto a la norma meteorológica, debido a que el mayor efecto de la lluvia está en la acumulación de largos períodos de sequía o precipitación.

La temperatura, por su parte, juega un papel importante en la producción agrícola porque determina un mayor consumo de agua del cultivo o la posibilidad de daños por heladas. Por lo tanto, la desviación anual de esta variable se calcula como el promedio de la diferencia de temperatura absoluta mensual durante un año con respecto a la norma meteorológica ($M_Anual_temp_{jt}$). En la temperatura es adecuado evaluar el efecto promedio que el acumulado; porque a diferencia de las precipitaciones, las temperaturas tienen un impacto mayor en eventos extremos, no de forma acumulada, por esta razón se empleó la media de la diferencia de las temperaturas promedio mensuales con respecto a la temperatura media usual en un mes. Esta medida está bastante cerca de la desviación estándar, que generalmente se usa en estos análisis.

Las variables climáticas se incluyeron con un rezago en el tiempo de un año, ya que los impactos del clima no se ven de inmediato, sino que se observan en el período siguiente, porque los efectos climáticos se evidencian durante el periodo de crecimiento del cultivo. Teóricamente, el distrito de riego debe mitigar los impactos de los cambios en la precipitación, por lo que en muchos trabajos esta variable ha demostrado aumentar la producción (Sun *et al.*, 2017, Sun *et al.*, 2016; Xue y Ren, 2016; Wang *et al.*, 2015). Por esa razón, como variable de adaptación, se emplea el distrito de riego ponderado por la precipitación anual ($Adap_precip_{jt}$); por otro lado, se estudia el impacto de las precipitaciones en cultivos transitorios, dado que estos suelen ser los más afectados ante precipitaciones extremas, para ello se ponderaron los cultivos transitorios y anuales por las precipitaciones ($ImpactTransit_{ijt}$).

Al incorporar el comportamiento pasado y presente del producto, con las medidas de producción y área rezagadas, y la medida de adaptación, la ecuación funcional de producción a estimar viene dada por:

$$\begin{aligned} \ln Production_{ijt} &= \beta_0 + \beta_1 \ln Production_{ijt-1} + \beta_2 \ln AREA_{ijt} + \beta_3 \ln AREA_{ijt-1} \\ &+ \beta_4 1.DistRiesgo_{jt} + \beta_5 2.DistRiesgo_{jt} + \beta_6 3.DistRiesgo_{jt} \\ &+ \beta_7 Permanent_{ijt} + \beta_8 D_Anual_prec_{jt} + \beta_9 M_Anual_temp_{jt} \\ &+ \beta_{10} Adap_precip_{jt} + \beta_{11} Impact_Transit_{ijt} + \epsilon_{ijt} \end{aligned}$$

Donde i es el cultivo, j el municipio, t es el año y ϵ_{ijt} es el vector de errores del modelo, compuesto por $\mu_{ij} + \vartheta_{it} + \zeta_{jt}$.

En el modelo se asumen efectos aleatorios, pero se controla por efectos fijos de municipio y año, por lo que éstos no están correlacionados por pares,

$$E(\mu_{it}) = 0, E(\vartheta_{it}) = 0, E(\zeta_{jt}) = 0$$

Además,

$$E(\mu_{ij}\mu_{i'j'}) = \begin{cases} \sigma_\mu^2 & i = i' \text{ y } j = j' \\ 0 & \text{para las demás} \end{cases}, E(\vartheta_{it}\vartheta_{i't'}) = \begin{cases} \sigma_\vartheta^2 & i = i' \text{ y } t = t' \\ 0 & \text{para las demás} \end{cases} \text{ y}$$

$$E(\zeta_{jt}\zeta_{j't'}) = \begin{cases} \sigma_\zeta^2 & j = j' \text{ y } t = t' \\ 0 & \text{para las demás} \end{cases}$$

Igualmente, se asume exogeneidad estricta, es decir, que los regresores no están correlacionados con los efectos fijos, lo cual permite el uso de estimadores por mínimos cuadrados generalizados. La información de producción, área y tipo de cultivo fue recopilada de las Evaluaciones Agropecuarias (EVA) que son documentos que contienen información que permiten identificar la producción, área sembrada y cosechada de cada uno de los municipios del país anualmente. Esta investigación usa los datos de los cultivos presentes en las EVA's de los 1.101 municipios colombianos observados anual y semestralmente durante 10 años, entre los años 2007 y 2017. La producción está dada en toneladas, el área está en hectáreas, y el tipo de cultivo, permanentes y transitorios, son variables dicotómicas. Debido a la alta dispersión de las variables producción y área se decidió usar sus valores en porcentajes.

El Cuadro 1 muestra el resumen de las variables de este modelo, donde la información climática, la precipitación y la temperatura provienen de las series históricas mensuales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). La información de los distritos de riego proviene del Instituto Colombiano de Desarrollo Rural (INCODER) y está reportada según su tamaño (En la base de datos recibida no hay especificación acerca de cómo la entidad genera esta clasificación. Sin embargo, en una revisión detallada de los datos se asume que está relacionada con el número de usuarios y la cantidad de cultivos que atiende). (pequeño, mediano, grande) se separó en pequeños ($1.DistRiesgo_{jt}$), medianos ($2.DistRiesgo_{jt}$) y grandes ($3.DistRiesgo_{jt}$). La información que se

encontraba a nivel municipal se agregó al nivel de cultivo, considerando su ubicación. Aunque se pensó en incluir una variable que mostrara si los cultivos necesitan riego, era muy difícil teniendo en cuenta que una misma variedad puede necesitar riego solo en ciertas zonas del país, y no es posible identificar eso de la base de datos con facilidad.

Cuadro 1. Resumen de las variables utilizadas en el análisis para el periodo de tiempo 2007-2017.

Variable	Media	Desviación estándar	Min	Max
L Production T	5.259569	2.238782	0	15.32978
DistRiego	0.5499605	0.8956629	0	3
LAREA	3.485493	1.654202	0	6.907755
D_Anuual_prec	575.7656	408.5402	0	9666.247
M_Anuual_temp	0.7006824	0.6513898	0.0711828	10.31765
Permanent	0.5151713	0.4997715	0	1
Adap_precip	262.9968	510.9296	0	4979.237
Impact_Transit	265.7291	381.4534	0	9666.247

Nota: Elaboración propia a partir de datos provenientes de Ideam (2018), MADR (2018), ADT (2017).

Resultados y discusión

El estudio se efectuó mediante una regresión con efectos aleatorios, pero manteniendo fijos los efectos por ubicación (municipio) y año. Los resultados del modelo permiten identificar que un aumento del 1 % en la producción del año anterior afecta positivamente la producción actual en un 0,76 %. Del mismo modo, al aumentar el área actual en un 1 %, la producción en el periodo t se incrementa en un 0,35 % y, la elasticidad del rezago del área corresponde a una reducción la producción actual en un 0,22 %. Además, se evidencia que la existencia y el tamaño de los distritos de riego inciden positivamente en la variable estudiada, confirmando la necesidad de continuar desarrollando Distritos de Adecuación de Tierras en el país (Cuadro 2).

Por otro lado, se encuentra que los cultivos permanentes tienen un impacto positivo en la producción agrícola, ya que estos cultivos tienen una mayor capacidad para soportar cambios repentinos en las variables climáticas. Esto se debe a que, por ejemplo, las raíces de los cultivos permanentes son más profundas, robustas o su tienen mayor abundancia lateral.

El árbol de mango de Cundinamarca, por ejemplo, se caracteriza por ser cultivado de manera tradicional y, en áreas con poca lluvia, en algunos casos hay cultivos con más de 20 años de siembra,

Cuadro 2. Estimadores del modelo.

VARIABLES	LproductionT
L.lproductiont	0.768*** (0.00166)
1.DistRiego	0.0129 (0.0135)
2.DistRiego	0.0347** (0.0135)
3.DistRiego	0.105*** (0.00598)
LArea	0.354*** (0.00290)
L.lArea	-0.223*** (0.00299)
L.D_Anuual_prec	-1.57e-05* (8.63e-06)
L.M_Anuual_temp	-0.0113** (0.00508)
Permanent	0.0483*** (0.00748)
Adap_precip	-1.41e-05 (8.75e-06)
Adap_Cultivo_precip	-5.10e-05*** (1.07e-05)
Constant	0.830*** (0.0198)
N	122,474
r ²	0.2827

Nota: Elaboración propia.
*** p<0.01, ** p<0.05

que forja árboles con sistemas de raíces fuertes y profundos, lo que les permite absorber agua por debajo del nivel freático, generando una estrategia de resiliencia que adquiere relevancia cuando hay variaciones en los ciclos invierno-verano-invierno. A pesar de que Germino et al. (2018), hace un estudio para gramíneas, explica que en la resistencia y resiliencia no sólo es importante la profundidad de las raíces sino la abundancia lateral, ya que estas son clave para su supervivencia y capacidad de competir por nutrientes en el suelo.

Lo anterior puede deberse a que los cambios abruptos en las variables climáticas pueden generar afectaciones en la producción de un período específico, pero estos tipos de cultivos recuperan su producción normal para el próximo período, es decir, los cultivos permanentes tienen una mayor capacidad de recuperación que los cultivos transitorios dada la ventana de tiempo

más larga tienen para volverse más resistentes. Sin embargo, se pueden encontrar algunas excepciones, como el maíz, que es un cultivo de ciclo corto y que tiene una condición genética más favorable, expresada en el desarrollo de raíces más profundas y una capacidad de recuperación mayor que, incluso, un cultivo permanente.

Asimismo, se evidenció que la variabilidad climática, medida a través de la desviación acumulada de la precipitación anual impacta positivamente la producción agrícola, aun cuando la magnitud del efecto es mínima. Por su parte, se encontró que un incremento en 1°C en el promedio de la desviación de la temperatura disminuye en un 0,01% el resultado en los cultivos del país (ver Cuadro 2). Estos aportan a la literatura de adaptación al cambio climático, porque tradicionalmente la política del país se concentra en mitigar los efectos de variaciones en precipitaciones, siendo que la variación en la temperatura, tal como lo muestra el modelo, es la que estaría incidiendo negativamente y de manera significativa en la actividad agrícola.

La variable que mide el uso de los distritos de riego como medida que ayuda a contrarrestar los efectos de la variabilidad climática (interrelación entre la lluvia y los distritos de riego) no es significativa y su valor es contraintuitivo. Esto puede explicarse porque es posible que el tamaño de los distritos de riego en los municipios no logre cubrir los requerimientos de agua de los cultivos en época de sequía o que no capturen el exceso de agua que evite que estos se aneguen. Esta es una limitante que existe, ya que no se cuenta con información sobre la disponibilidad y el acceso al agua en los distritos de riego.

El modelo muestra que los cultivos transitorios parecían menos adaptados a las variaciones climáticas de precipitación, lo que podría causar en condiciones extremas modificaciones en la evapotranspiración en monocultivos de tubérculos y algunos vegetales, como guisantes y frijoles, causando déficit hídrico en etapas importantes del cultivo, como en el crecimiento vegetativo y el llenado de fruta.

Estas respuestas son más evidentes en los esquemas de manejo convencionales, donde los productores tienden a tener monocultivos en suelos libres de malezas y expuestos a estas variables climáticas.

Sin embargo, la estrategia agrícola en cultivos transitorios implica prácticas culturales, como la rotación de cultivos a lo largo del tiempo, lo que puede estar influyendo en la disminución de las áreas plantadas con cultivos y reflejado en el aumento de las áreas destinadas a actividades ganaderas, que no se consideró en este modelo.

Finalmente, es importante indicar que el *test de Hausmann* modificado fue utilizado para verificar la exogeneidad del modelo, mientras que la prueba de varianza $H_0 = \sigma_u^2$, contra $H_A > \sigma_u^2 \rightarrow \sigma_{\beta_{it}}^2 = \sigma_{\epsilon_{it}}^2 = 0$, se utilizó para demostrar que el modelo se encuentra bien especificado. También se utilizó una prueba de colinealidad entre los regresores y los efectos aleatorios. Todas las pruebas mostraron que el modelo estaba bien especificado y presentaban el ruido blanco a pesar de que las variables utilizadas solo explican la producción en un 28%.

Conclusiones y recomendaciones

El modelo econométrico desarrollado muestra los impactos de las variaciones en temperatura y precipitación sobre la producción agrícola en Colombia. Se encontró que los cambios (aumento) en el promedio de la temperatura con respecto a la media histórica disminuyen la producción agrícola nacional, mientras que la desviación acumulada de la precipitación anual impacta positivamente los niveles de producción del sector. Esto sugiere la importancia de que la política agrícola del país también trabaje por identificar y expandir prácticas sostenibles que ayuden a contrarrestar los efectos que traen consigo los incrementos en la temperatura a largo plazo sobre esta actividad económica. Prácticas como el uso de sombríos podrían influir en la reducción de temperaturas localmente, como se emplea en el cultivo de café.

De igual forma, los resultados indican que los distritos de riego han tenido un efecto positivo sobre la producción de los cultivos. Sin embargo, cuando se analizó si este tipo de tecnología es una buena medida de adaptación a la variabilidad climática se evidenció que esta variable no tiene un impacto significativo. Esto posiblemente se debe a que estos aún solo pueden suministrar agua en tiempos de sequía, pero las mayores

pérdidas se dan en tiempos de inundación. Por lo tanto, es necesario buscar alternativas en la construcción que permitan drenar excesos de agua a canales, que en tiempos de sequía también funcionen como distritos de riego.

El modelo de panel de datos tridimensional presentado en este documento mostró una gran aplicabilidad a pesar de su bajo uso y el reducido número de documentos que existen sobre los efectos climáticos en la producción agrícola. Esto se origina, en gran medida, por la escasez de información cartográfica más detallada en Colombia que limita utilizar modelos econométricos más refinados y robustos, como el utilizado en este trabajo.

Finalmente, estudios posteriores pueden refinar el ejercicio desarrollado si incluyen información sobre el acceso al agua por distrito de riego y los niveles de lluvia y caudales de los ríos en las diferentes cuencas geográficas colombianas, a fin de determinar el equilibrio o lazos de refuerzo en la producción. Es necesario también analizar el impacto de medidas que mitiguen los efectos asociados a cambios en la temperatura más que a los relacionados al régimen de precipitación.

Literatura citada

- Adams, R. M., Hurd, B. H., Lenhart, S. y Leary, N. (1998). Effects of global climate change on agriculture: an interpretative review. *Climate research*, 11(1), 19-30.
- Adams, R. M., Hurd, B. H. y Reilly, J. (1999). Agriculture & global climate change: a review of impacts to U.S. agricultural resources. Prepared for the *Pew Center on Global Climate Change*, February.
- Allwood J.M., V. Bosetti, N.K., Dubash., Gómez-Echeverri, L y C., von Stechow. (2014). *Glossary. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel & J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ANDI. (2019). *Colombia: Balance 2018 y Perspectivas 2019*. Recuperado de <https://bit.ly/2IqofVP>
- Balázi, L. y Mátyás, L. (2017). *The Econometrics of Linear Models for Multi-dimensional Panels* (Doctoral dissertation, Central European University Budapest, Hungary).
- Balazsi, L., Matyas, L. y Wansbeek, T. (2018). The estimation of multidimensional fixed effects panel data models. *Econometric Reviews*, 37(3), 212-227.
- BID-CEPAL-DNP. (2014). *Impactos Económicos del Cambio Climático*. (S. Calderón, G. Romero, A. Ordóñez, A. Álvarez, C. Ludeña, L. Sánchez, . . . M. Pereira, Edits.) Washington D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 221 y Naciones Unidas, LC/L.3851.
- Balazsi, L., Matyas, L. y Wansbeek, T. (2018). The estimation of multidimensional fixed effects panel data models. *Econometric Reviews*, 37:3, 212-227, DOI: 10.1080/07474938.2015.1032164
- Bryant, C. R., Smit, B., Brklacich, M., Johnson, T., Smithers, J., Chiotti, Q. y Singh, B. (2000). Adaptation in Canadian agriculture to climatic variability and change. *Climatic Change*, 45, 181-201.
- Chen, C. C., McCarl, B. A. y Schimmelpfennig, D. E. (2004). Yield variability as influenced by climate: A statistical investigation. *Climatic Change*, 66(1-2), 239-261.
- CIIFEN. (Sine Die). *¿Qué es el cambio climático?* Recuperado de <https://bit.ly/2riC4P8>
- DNP. (2018). *Documento CONPES 3926. Política de Adecuación de Tierras 2018-2038*. Recuperado de <https://bit.ly/39KdHM6>.
- Fernández, M. (2013). *Efectos del Cambio Climático en la Producción y Rendimiento de Cultivos por Sectores. Evaluación del Riesgo Agroclimático por Sectores*. Fondo Financiero De Proyectos De Desarrollo-FONADE e Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales-IDEAM. Recuperado de <https://bit.ly/2bD4xYg>.
- Germino, M. J., Fisk, M. R. y Applestein, C. (2019). Bunchgrass Root Abundances and Their Relationship to Resistance and Resilience of Burned Shrub-Steppe Landscape. *Rangeland Ecology & Management*, 72(5), 783-790.
- IDEAM (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: Ideam.
- IPCC. (2014). *Climate change: Impacts, adaptation, and vulnerability: Regional aspects*. Cambridge: University Press.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: impacts, adaptation, and vulnerability*. Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. y Hanson, C.E. (Eds.), Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC. (2018). Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable*

- development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press
- Isik, M. y Devadoss, S. (2006). An analysis of the impact of climate change on crop yields and yield variability. *Applied Economics*, 38(7), 835-844.
- Just, D., Wolf, S. A., Wu, S. y Zilberman, D. (2006). Effect of information formats on information services: Analysis of four selected agricultural commodities in the U.S. *Agricultural Economics*, 35, 289–301
- Lewandrowski, J. & Schimmelpfennig, D. (1999). Economic implications of climate change for U.S. agriculture: assessing recent evidence. *Land Economics*, 75, 39–57.
- Mátyás, L. y Balázi, L. (2013). *The estimation of multi-dimensional fixed effects panel data models* (No. 2012_2). Department of Economics, Central European University.
- McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J. y White, K. S. (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D. y Shaw, D. (1994). The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis. *American Economic Review*, 84, 753–71.
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D. y Shaw, D. (1996). Climate impacts on aggregate farm values: accounting for adaptation. *Agriculture and Forest Meteorology*, 80, 55–67.
- Ortiz, S. A. R. y Gonzalez, J. P. (2017). Selección de tecnologías para la adaptación al cambio climático en el sector cacaoero huilense. *Creecer Empresarial: Journal of Management and Development*.
- Perfetti, J., Delgado, M., Blanco, J., Paredes, G., García, A., Naranjo, J., Pantoja, J. y González, L. (2019). *Adecuación de tierras y el desarrollo de la agricultura colombiana: políticas e instituciones*. No. 017614. Fedesarrollo.
- Polsky, C. & Easterling, W. E. (2001) Adaptation to climate variability and change in the U.S. Great Plains: a multiscale analysis of Ricardian climate sensitivities, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85(1–3), 133–44.
- Santer, B. (1984). The impacts of a CO₂-induced climatic change on the agricultural sector of the European Communities. En *Socioeconomic Impacts of Climatic Changes Due to a Doubling of Atmospheric CO₂ Content* (Eds) H. Meinl et al., Commission of the European Communities, Contract No. CLI-063-D, Dornier-System, Friedrichshafen.
- Sun, S., Zhang, C., Li, X., Zhou, T., Wang, Y., Wu, P. y Cai, H. (2017). Sensitivity of crop water productivity to the variation of agricultural and climatic factors: A study of Hetao irrigation district, China. *Journal of cleaner production*, 142, 2562-2569.
- Tao, F., Zhang, Z., Liu, J., y Yokozawa, M. (2009). Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: A new super-ensemble-based probabilistic projection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(8), 1266-1278.
- Tao, F., Hayashi, Y., Zhang, Z., Sakamoto, T., & Yokozawa, M. (2008). Global warming, rice production, and water use in China: developing a probabilistic assessment. *Agricultural and forest meteorology*, 148(1), 94-110.
- Tao, F., Yokozawa, M., Hayashi, Y. y Lin, E. (2003). Future climate change, the agricultural water cycle, and agricultural production in China. *Agriculture, ecosystems & environment*, 95(1), 203-215.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). (2016). *Fenómeno El Niño: Análisis comparativo 1997 - 1998 // 2014 - 2016*.
- Wang, M. H., Shao, G. C., Meng, J. J., Chen, C. R. y Huang, D. D. (2015). Variable fuzzy assessment of water use efficiency and benefits in irrigation district. *Water Science and Engineering*, 8(3), 205-210.
- Williams, K. D., Ringer, M. A. y Senior, C. A. (2003). Evaluating the cloud response to climate change and current climate variability. *Climate Dynamics*, 705–721.
- World Bank. (2009). *Gender in agriculture sourcebook*. Washington, DC: Author
- Xue, J. y Ren, L. (2016). Evaluation of crop water productivity under sprinkler irrigation regime using a distributed agro-hydrological model in an irrigation district of China. *Agricultural Water Management*, 178, 350-365.