

Efecto del cambio climático sobre la producción de maíz en las regiones de México

Osvaldo Urbano Becerril Torres¹

Gabriela Munguía Vázquez²

Sara Quiroz Cuenca³

Resumen

El cambio climático es un problema que preocupa a la humanidad, sobre todo si de ello depende la sobrevivencia de los seres humanos en la superficie del planeta y, en general la de los seres vivos. No están lejanas otras preocupaciones, como las migraciones inducidas por este fenómeno del clima. La escasez de agua, la desertificación, el deshielo en los glaciares, el aumento del nivel del mar y su calentamiento, las inundaciones por lluvias torrenciales, el aumento de la temperatura, así como la escasez de alimentos por cambios en las vocaciones productivas de las regiones, son solo algunas inquietudes de la humanidad.

Las diferentes áreas de conocimiento científico tratan de ofrecer soluciones a estos problemas: los climatólogos, los ambientalistas, e incluso los historiadores son algunos de los protagonistas, no obstante, los economistas también tienen algo que decir. En este contexto se hace uso de las herramientas de la ciencia económica para aportar al entendimiento de la relación existente entre cambio climático y la producción agrícola de uno de los cereales más importantes para la dieta de la sociedad mexicana: el maíz.

Desde la óptica de la ciencia económica, por ejemplo, Tol (2009) argumenta que los impactos globales promedio serían comparables a la pérdida de bienestar de un pequeño porcentaje de los ingresos, pero sustancialmente mayores en los países pobres. Las estimaciones actuales de los costos de los daños causados por el cambio climático son incompletas y presentan sesgos positivos y negativos. Desde una perspectiva de bienestar, el impacto del cambio climático es problemático porque la población es endógena y porque los análisis de políticas deberían separar la impaciencia, la aversión al riesgo y la aversión a la inequidad entre los países y dentro de ellos.

Este artículo se plantea el objetivo de analizar el efecto que tiene una alteración significativa de la precipitación pluvial y la temperatura sobre la producción de maíz de temporal en las regiones de México. Para ello, en el apartado dos se presenta el marco teórico subyacente al objeto de estudio. En el tres se da cuenta del estado del objeto de estudio respecto a investigaciones que relacionan la producción de maíz con otras variables, o bien que emplean la metodología de vectores autorregresivos en su análisis. En el cuarto se presenta la metodología de vectores autorregresivos a emplear para el análisis de las regiones consideradas en el mismo y, en el quinto apartado se presentan los resultados y conclusiones a las que se ha llegado. Entre ellas, que el efecto de un shock de temperatura en la región sur es de más larga duración en la producción de maíz, aunque de menor magnitud, seguido de la región centro. Así mismo, un shock en la temperatura tiene un efecto de más larga duración sobre la precipitación de la región centro. Por último, un

¹ Dr. Osvaldo Urbano Becerril Torres. Universidad Autónoma del Estado de México, obecerrilt@uaemex.mx

² Dra. Gabriela Munguía Vázquez. Universidad Autónoma del Estado de México, gmunguiav@uaemex.mx

³ Dra. Sara Quiroz Cuenca. Universidad Autónoma del Estado de México, squirozc@uaemex.mx

shock en la temperatura tiene un efecto de más largo plazo sobre sí misma en la región norte, seguida de la región centro.

Conceptos clave: Cambio climático, producción de maíz y cambio climático, vectores autorregresivos y función impulso respuesta.

Introducción

La literatura sobre las preocupaciones humanas es amplia, cada una de ellas como objeto de estudio a ser investigado, siendo importante abundar en todas y cada una de ellas, para tener un mejor entendimiento. Ante este panorama, en esta investigación se analiza la relación existente entre variables climáticas y la incidencia en el sector agropecuario de las regiones de México, de manera particular sobre la producción de maíz de temporal. Se hace una revisión de la literatura que trata de explicar las relaciones entre las variables climáticas y la producción agrícola en diferentes regiones o países, identificando que para México también se han realizado algunos de ellos. No obstante, como se podrá observar, pocos abordan el efecto de las precipitaciones y la temperatura como factores relevantes que inciden en la producción del maíz, a pesar de ser un producto de gran importancia para la dieta de los mexicanos.

Autores como Seidl, Thom, Kautz, et al. (2017) reconocen que las perturbaciones forestales son sensibles al clima, presentando un resumen global de los efectos del cambio climático sobre importantes agentes de perturbación abióticos (incendios, sequías, viento, nieve y hielo) y bióticos (insectos y patógenos). Las condiciones más cálidas y secas facilitan en particular las perturbaciones causadas por incendios, sequías e insectos, mientras que las condiciones más cálidas y húmedas aumentan las perturbaciones causadas por el viento y los patógenos. Es probable que las interacciones generalizadas entre agentes amplifiquen las perturbaciones, mientras que los efectos climáticos indirectos, como los cambios en la vegetación, pueden atenuar la sensibilidad a largo plazo de las perturbaciones al clima. Concluyen que tanto los ecosistemas como la sociedad deben estar preparados para un futuro cada vez más perturbado de los bosques.

Por su parte Aydinalp y Cresser (2008) abordan el análisis del cambio climático y la agricultura, documentando que el clima es el factor más importante para la producción agrícola. Los efectos potenciales del cambio climático en la agricultura han motivado la concentración de la investigación en los posibles efectos físicos del cambio climático en la agricultura, como los cambios en el rendimiento de los cultivos y el ganado, así como en las consecuencias económicas de estos posibles cambios en el rendimiento. El análisis de Aydinalp y Cresser estudia los efectos del cambio climático en la agricultura. Los principales intereses son los hallazgos relacionados con el papel de las adaptaciones humanas en la respuesta a este cambio, los posibles impactos regionales en los sistemas agrícolas y los posibles cambios en los patrones de producción y precios de los alimentos.

El clima es un factor importante de la productividad agrícola. El papel fundamental de la agricultura en el bienestar humano ha generado preocupación en muchas organizaciones y otros sectores con respecto a los posibles efectos del cambio climático en la productividad agrícola. Se espera que el cambio climático afecte la producción agrícola y ganadera, los balances hidrológicos, los suministros de insumos y otros componentes de los sistemas agrícolas (Aydinalp y Cresser, 2008).

Como reconocen Aydinalp y Cresser, los efectos potenciales del cambio climático en la agricultura han motivado diversas investigaciones, y siguen siendo objeto de estudio en el presente. De manera enunciativa, pero no limitativa, se pueden mencionar los de Parry y Carter (1989), Adams, Hurd, Lenhart y Leary (1998), Reilly y Hohmann (1993). Algunos se ha realizado para países o regiones, como el de Backlund, Janetos y Schimel (2008) para Estados Unidos, los de Aydinalp y Cresser (2008) y Kane, Reilly y Tobey (1992) de manera global; Malhi, Kaur y Kaushik (2021) analizan posibles estrategias de mitigación; Iglesias, Garrote, Quiroga y Moneo (2012) para Europa; Ngaira (2007) y Calzadilla, Zhu, Rehdanz, Tol y Ringler (2013) para África; Smit y Cai (1996) y Chen, Chen y Xu (2016) y Chandio, Jiang, Rehman y Rauf (2020) para China; Mendelsohn (2014) para Asia; Karimi, Karami y Keshavarz (2018) para Iran; Dumrul y Kilicaslan (2017) y Dudu y Cakmak (2018) para Turquía; Molua (2007) para Cameroon; Trinh (2018) para Vietnam; y Ahmad, Alam y Haseen (2011) para India.

Para México, trabajos que relacionan el cambio climático y la agricultura son escasos, entre los que se pueden mencionar el de Gay, Estrada, Conde, Eakin y Villers (2006); Conde, Liverman, Flores, Ferrer, Araújo, Betancourt y Gay (1998); Galindo, Reyes y Alatorre (2015); Mundo-Molina (2015); Arce, Monterroso, Gómez, Palacios, Navarro, López y Conde (2020); Ureta, González, Espinosa, Trueba, Piñeyro-Nelson y Álvarez-Buylla (2020); Murray-Tortarolo, Jaramillo y Larsen (2018); Silva, Monroy y Martínez (2023); Donatti, Harvey, Martinez-Rodriguez, Vignola y Rodriguez (2019); Escalante-Sandoval (2020); Hellin, Bellon y Hearne (2014); y Liverman (2019). No obstante, pocos abordan el efecto de las precipitaciones y la temperatura como factores relevantes que inciden en la producción del maíz en México, a pesar de ser un producto de gran importancia para la dieta de los mexicanos.

1. Marco teórico

La variación estadísticamente significativa en el estado medio del clima o en su variabilidad, que se mantiene durante un período de tiempo prolongado (décadas o más), se denomina cambio climático (Fellino y Salvacoin, 2007). A partir de esta definición, se puede entender que el mundo ha experimentado en los últimos años este fenómeno, cuyo origen son las acciones antropogénicas que dan origen a los gases de efecto invernadero.

Aydinalp y Cresser (2008) aceptan que el cambio climático es causado por la liberación de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Estos gases se acumulan en la atmósfera, lo que provoca el calentamiento global, el cual se identifica con los cambios en los parámetros relacionados con el clima global, como la temperatura, las precipitaciones, la humedad del suelo y el nivel del mar. Sin embargo, la fiabilidad de las predicciones sobre el cambio climático es incierta. No existen datos concretos sobre cuál será definitivamente el resultado del aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y no se conocen plazos concretos. La agricultura es un sector que es importante tener en cuenta en términos del cambio climático. El sector agrícola contribuye al cambio climático y se verá afectado por el cambio climático.

De acuerdo con Aydinalp y Cresser (2008) los efectos del cambio climático sobre la agricultura variarán en las distintas partes del mundo. Determinar cómo afectará el cambio climático a la agricultura es complejo; es probable que se produzcan diversos efectos. Los cambios de temperatura, así como los cambios en los patrones de precipitaciones y el aumento de los niveles de CO₂ que se prevé que acompañarán al cambio climático tendrán efectos importantes sobre la agricultura mundial, especialmente en las regiones tropicales. Se espera que la productividad de

los cultivos se altere debido a estos cambios en el clima y a los fenómenos meteorológicos y a los cambios en los patrones de plagas y enfermedades. Las zonas de tierra adecuadas para el cultivo de cultivos básicos clave podrían sufrir cambios geográficos en respuesta al cambio climático. Además de los cambios en la frecuencia de los fenómenos climáticos extremos, los cambios en las precipitaciones y la temperatura podrían ser perjudiciales y costosos para la agricultura.

Malhi, Kaur y Kaushik (2021) admiten que el cambio climático es una amenaza global para la seguridad alimentaria y nutricional del mundo. A medida que aumentan las emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, también aumenta la temperatura debido al efecto invernadero. La temperatura media mundial aumenta continuamente y se prevé que aumente 20° C hasta el Año 2100, lo que provocaría importantes pérdidas económicas a nivel mundial.

El cambio climático tiene efectos multifactoriales. Está afectando a los océanos, como se reportaba ya al final del siglo XX en Short y Neckles (1999), quienes argumentan que un efecto importante del aumento de la temperatura global sobre las praderas marinas se verá reflejado en la alteración de las tasas de crecimiento y otras funciones fisiológicas de las propias plantas. La distribución de las praderas marinas cambiará como resultado del aumento del estrés térmico y de los cambios en los patrones de reproducción sexual. Los efectos indirectos de la temperatura pueden incluir cambios en la comunidad vegetal como resultado del aumento de la eutrofización y cambios en la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos. Los efectos directos del aumento del nivel del mar sobre los océanos costeros se manifestarán en el aumento de la profundidad del agua, el cambio de la variación de las mareas, la alteración del movimiento del agua y el aumento de la intrusión de agua de mar en los estuarios y ríos.

Pörtner y Peck (2010) reconocen que se prevé que el cambio climático actual afecte a los organismos individuales durante todas las etapas de la vida, lo que afectará a las poblaciones de una especie, a las comunidades y al funcionamiento de los ecosistemas. Estos efectos del cambio climático pueden ser directos, a través de cambios en las temperaturas del agua y las fenologías asociadas, la duración y frecuencia de los episodios de hipoxia, a través de las tendencias de acidificación de los océanos o a través de cambios en la hidrodinámica y en el nivel del mar. Así, frente a estos posibles escenarios, se cuenta con un conjunto de estudios que documentan los impactos climáticos sobre diversas variables de tipo agropecuario, como se verá en el siguiente apartado.

2. Marco contextual. Estado del objeto de estudio

El análisis de la producción del maíz se ha relacionado con diversas variables como las interacciones dinámicas de los precios de mercado del etanol, el petróleo crudo y el maíz en los Estados Unidos desde enero de 2005 hasta diciembre de 2014 (Dimitriadis y Katrakilidis, 2020). El análisis empírico emplea metodologías de series temporales alternativas basadas en enfoques de estimación de sistemas y ecuaciones únicas para la cointegración y, más específicamente, aplicaron de manera complementaria las metodologías de cointegración de rezagos distribuidos autorregresivos y de máxima verosimilitud de Johansen.

Gil y Albisu (1993) mediante la técnica de Vectores Autoregresivos analizan los cambios sectoriales de los cereales en España tras su inserción a la Unión Europea, así también estudian la dinámica de corto plazo entre los precios del trigo, la cebada y el maíz y de su principal sustituto, para realizar predicciones de corto y mediano plazo. En México, tres trabajos que se alinean con el de Gil y Albisu, son los de García (2017), López (2020) y López-García, Martínez-Damián y

Arana-Coronado (2021), quienes centran sus esfuerzos en el análisis del maíz, al establecer como objetivo construir un modelo predictor del precio esperado de este cereal, como una alternativa de previsión de precios en México. En su estudio emplean la metodología de series de tiempo, entre ellas la de modelos ARIMA, VAR y VCE, encontrando que estos últimos proporcionan mejores predicciones.

Liao, Trujillo-Barrera y Wiggins (2016) analizan la transmisión de precios y volatilidad entre los mercados de gas natural, fertilizantes (amoníaco) y maíz en Estados Unidos. Un tema que tradicionalmente ha sido ignorado en la literatura a pesar de su importancia significativa. Estiman conjuntamente un modelo vectorial de corrección de errores para la ecuación de media condicional y un modelo de heterocedasticidad autorregresiva generalizada multivariada. El primero para examinar la dinámica de precios de corto y largo plazo entre los mercados de gas natural, fertilizantes y maíz. El segundo para evaluar el efecto de contagio de la volatilidad entre mercados.

Entre los hallazgos de Liao, et al. (2016) se encuentran una interacción significativa entre los mercados de fertilizantes y maíz, mientras que solo existe un vínculo leve en precios y volatilidad entre esos mercados y el gas natural durante el período 1994-2014. Expresan que no solo existe una relación positiva entre los precios del maíz y el amoníaco en el corto plazo, sino que ambos precios reaccionan a las desviaciones de la paridad de largo plazo.

Como reconocen Shakoor, Rashid, Saboor, Khurshid, Husnain y Rehman (2017), el aumento del CO₂ atmosférico, así como las variaciones de temperatura y las precipitaciones, son herramientas útiles para predecir escenarios climáticos en una región. Los cultivos se benefician o se ven afectados negativamente por estos cambios en el clima de una zona. Así también, el maíz es uno de los productos más cultivados en el mundo. En el estudio de Shakoor, et al. se emplearon modelos de vectores autorregresivos (VAR), con la propuesta de Sims (1980), con datos de series temporales de 1980 a 2013 para Pakistán, para estimar los efectos potenciales del cambio climático en la producción de maíz.

Los resultados de Shakoor, et al. (2017) identificaron que la temperatura media afectará negativamente al cultivo de maíz, lo que provocará una reducción del 6% en la producción hasta el año 2030. Así también, la temperatura mínima media provocó un aumento del 9% en la producción hasta 2021. El aumento de las precipitaciones generales también beneficiará a la producción. Esta aumentará un 2% para el año 2030 con respecto al año base, es decir, 1980. La disponibilidad de agua en los períodos de crecimiento de los cultivos y la aplicación de fertilizantes (hoy o en el futuro) sin duda aumentarán la producción.

Este escenario exige la elaboración de estrategias de adaptación para los agricultores, que deben estar disponibles. Esta debería ser la principal intervención política del gobierno para hacer frente al cambio climático en la agricultura y, en particular, en el maíz. La gestión de fertilizantes y la elección de variedades de cultivo de acuerdo con el cambio climático abordarán en el futuro esta grave preocupación que se espera (Shakoor, et al. 2017).

Es probable que el continuo cambio climático afecte drásticamente el crecimiento, el ciclo del agua y la producción de cultivos alimentarios básicos en muchas regiones del mundo (Parry, Rosenzweig, Iglesias y Fischer, 2004; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). Se supone que el crecimiento y desarrollo de los cultivos se ve afectado de diversas maneras, que incluyen cambios en las precipitaciones (tanto espacial como temporalmente) e impactos directos en el ciclo hídrico de los cultivos que introducen estrés hídrico en el desarrollo de los cultivos (Tao, Yokozawa, Hayashi, y Lin, 2003; Climate Change Center, 2014). Los países poco desarrollados

son vulnerables al cambio climático porque carecen de tecnología de última generación, recursos e instituciones eficientes (Kurukulasuriya y Rosenthal, 2013). En los países de bajos ingresos, el rendimiento de los cultivos se ve obstaculizado por los cambios en la temperatura y los niveles de precipitaciones, debido a la escasa adopción de medidas.

Lizama-Fuentes, Cabas-Monje y Velasco-Fuenmayor (2017) estudiaron el mecanismo de transmisión del precio mundial del maíz sobre el local entre Chile-Argentina. Para ello hicieron uso de diversas metodologías econométricas entre las cuales se encuentran la especificación clásica de transmisión de los precios utilizada por Kinnucan y Forker (1987). Así también se consideraron modelos autorregresivos que cuentan con umbral a un modelo estándar de corrección de errores como el propuesto en Goodwin y Piggott (2001) y los propuestos por Araujo-Enciso (2011), Myers y Jayne (2011) y Abidoye y Labuschagne (2014). Para el análisis de cointegración hicieron uso de las propuestas de Johansen (1991) y de Engle y Granger (1987).

Peri (2017) reconoce que las anomalías climáticas, y en particular los fenómenos extremos, pueden alterar los rendimientos y las existencias agrícolas. Para probarlo, en su investigación emplea una función de respuesta al impulso de volatilidad a partir de un modelo GARCH multivariado, para investigar los efectos de la variabilidad de los shocks climáticos sobre la volatilidad de los precios internacionales del maíz y la soja de 1960 a 2014.

Los precios de los alimentos han experimentado enormes movimientos y volatilidad en el pasado reciente, que pueden atribuirse predominantemente al cambio climático. Los fenómenos meteorológicos extremos, como sequías, inundaciones y olas de calor tienen efectos adversos en la producción agrícola en áreas donde la agricultura depende del clima. (Waiguru, Kyalo y Gichuhi (2018)). Waiguru, et al. reconocen que las variaciones climáticas ejercen un fuerte impacto e influencia en muchos sectores, incluidos, entre otros, la silvicultura, la agricultura, el mantenimiento de carreteras, el transporte público y el turismo. Es cierto que el sector agrícola es el principal sector socioeconómico que ha recibido los mayores daños del cambio climático. En muchos países, el clima y las condiciones meteorológicas a corto plazo son el principal determinante, o más bien la fuerza impulsora, de la producción agrícola.

Waiguru, et al. realizan un análisis de los precios del maíz usando vectores autorregresivos estructurales y shocks climáticos, para investigar la relación dinámica entre los precios del maíz y los indicadores agroclimáticos extremos. El estudio utiliza herramientas de vectores autorregresivos estructurales, causalidad de Granger, función de respuesta al impulso y descomposición de la varianza del error de pronóstico para examinar la relación dinámica entre los indicadores meteorológicos extremos (temperatura mínima y máxima y precipitación) y los precios mayoristas del maíz.

El estudio estableció que existe causalidad de Granger entre los precios del maíz y las variables meteorológicas. Por lo tanto, los indicadores agroclimáticos son significativos para predecir los precios futuros del maíz. Principalmente, esta significancia se puede inferir de la dependencia de la producción agrícola local en los patrones fenológicos. Waiguru, et al. (2018).

Lysias (2018) analizó las posibles causalidades entre las variables climáticas y la producción de maíz en Sudáfrica utilizando datos de series temporales para el período de 1924 a 2016, con el análisis de causalidad de Granger en un contexto de vectores autorregresivos para determinar si existen bucles de retroalimentación entre los elementos climáticos y la producción de maíz en Sudáfrica. Los resultados del análisis de Granger sugieren una causalidad bidireccional que se da entre la producción de maíz y la temperatura. Se descubrió que las precipitaciones por sí

solas no influyen significativamente en la producción, pero una combinación de temperatura y precipitaciones sí afecta la producción en Sudáfrica.

Brako, Li, Appiah-Otoo, Ankrah y Nyamah (2022) modelan los impactos del cambio climático en la producción de maíz y soja en Ghana, analizando la influencia de las emisiones de CO₂, las precipitaciones, el crédito interno y el consumo de fertilizantes en la productividad del maíz y la soja, utilizando un modelo autorregresivo de rezago distribuido dinámico para el período de 1990 a 2020. Los hallazgos indicaron que el cambio climático mejora los rendimientos de maíz y soja en Ghana tanto a corto como a largo plazo. Además, los resultados de la causalidad de dominio de frecuencia mostraron que el cambio climático causa rendimiento de maíz y soja en el largo plazo. Estos resultados fueron robustos al uso del estimador de mínimos cuadrados ordinarios y la técnica de respuesta al impulso. Los hallazgos muestran que las estrategias de gestión de cultivos y agua, así como la disponibilidad de información, deben considerarse en la producción de alimentos para mejorar la resistencia al cambio climático y a las circunstancias climáticas adversas.

La revisión de literatura ha permitido identificar un conjunto de estudios relacionados con la producción agrícola y en particular con el maíz. Se ha podido identificar también, algunas de las metodologías empleadas para el análisis, entre ellas las de vectores autorregresivos, por lo que, en el siguiente apartado se presenta la metodología a emplear en este estudio.

3. Metodología

Para el análisis regional se emplea el método propuesto por Becerril, Munguía y Del Rivero (2024), donde se establecen tres regiones, determinadas por los paralelos geográficos que atraviesan el territorio de México, definiendo tres regiones geográficas: la norte, la centro y la sur, las cuales consideran a las entidades federativas según se presenta en la tabla 1:

Tabla 1. Regiones geográficas de México

Región norte. Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Zacatecas.
Región centro. Aguascalientes, CDMX, Colima, Estado de México, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Puebla, Querétaro, Tlaxcala.
Región sur. Campeche, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz, Yucatán

Fuente: Elaboración de los autores con datos de Becerril, Munguía y Del Rivero (2024)

Así también, se hace uso de la propuesta econométrica de vectores autorregresivos en el ámbito del análisis de series de tiempo, para obtener la función de respuesta al impulso, y determinar la temporalidad de los efectos en la producción de maíz ante un shock de una desviación estándar en las innovaciones del sistema de ecuaciones.

Como se reporta en Sims (1980), los modelos VAR permiten obtener una respuesta dinámica de las variables endogenizadas, ante shocks en las innovaciones del sistema; sin embargo, si existe correlación contemporánea entre estas, se pueden generar conclusiones equivocadas, lo cual se puede evitar mediante alguna transformación ortogonal del vector de residuales, para que este sea la identidad. Esto se puede realizar a través de la descomposición de Cholesky a la matriz de varianzas covarianza no transformada (Gil y Albusu, 1993).

Con base en la teoría econométrica se establece una estructura vectorial autorregresiva reducida (VAR), la cual permite expresar cada variable contemporánea como una función lineal de las variables rezagadas de todas las variables consideradas en el sistema, así como un término de error o innovación, tal que si hay p rezagos.

La expresión en forma matricial compacta de un vector autorregresivo se presenta en la ecuación (1).

$$y_t = A_1 y_{t-1} + \dots + A_p y_{t-p} + Bx_t + \epsilon_t \quad (1)$$

En esta ecuación y_t hace referencia a un vector de variables endógenas contemporáneas, x_t considera un vector de variables exógenas, A_1 , A_p y B son matrices de estimadores de coeficientes, y ϵ_t es un vector que se corresponde con las innovaciones (IHS Global, 2016, p. 643).

Para analizar los efectos dinámicos del sistema VAR, cuando el modelo recibe un shock de una desviación estándar en las innovaciones, se emplea la función de respuesta al impulso. Waiguru, Kyalo y Gichuhi (2018) expresan que la respuesta dinámica de los precios de mercado (precios mayoristas del maíz) a los cambios en los indicadores meteorológicos se puede examinar a través del análisis de respuesta al impulso. Para ello se puede hacer uso de la representación de promedio móvil (MA) del modelo VAR para rastrear los efectos dinámicos de los shocks en el sistema sobre cada variable bajo investigación. En el siguiente apartado, se presenta el vector autorregresivo de forma desplegada, para incluir las variables consideradas en el análisis objeto de estudio en esta investigación.

4. Resultados y conclusiones

Para visualizar la dinámica particular del modelo de vectores autorregresivos, las ecuaciones (2), (3) y (4) muestran de forma desplegada cada una de las variables consideradas en el estudio, así como el número de rezagos considerado, y las innovaciones correspondientes a cada una de las ecuaciones del sistema.

$$Prod_maíz_t = \alpha_0 + \beta_1 Prod_maíz_{t-1} + \gamma_1 precipitación_{t-1} + \delta_1 temperatura_{t-1} + \epsilon_{t,1} \quad (2)$$

$$Precipitación_t = \alpha_0 + \beta_1 Prod_maíz_{t-1} + \gamma_1 precipitación_{t-1} + \delta_1 temperatura_{t-1} + \epsilon_{t,2} \quad (3)$$

$$Temperatura_t = \alpha_0 + \beta_1 Prod_maíz_{t-1} + \gamma_1 precipitación_{t-1} + \delta_1 temperatura_{t-1} + \epsilon_{t,3} \quad (4)$$

La variable *Prod_maíz* reporta la producción de este cereal, en unidades físicas, medidas en toneladas, obtenidas en tierras de cultivo de temporal, para cada una de las tres regiones geográficas establecidas en la metodología. La variable *Precipitación* representa las precipitaciones en milímetros, a nivel regional promedio. La variable *Temperatura* representa las temperaturas en grados Celsius, a nivel regional promedio, durante el periodo de estudio, el cual comprende el periodo 1985-2022. Así también se emplea la función impulso respuesta para caracterizar el efecto que tiene un shock de una desviación estándar en las innovaciones, sobre las variables contemporáneas del VAR, e identificar si este es permanente, transitorio o nulo.

Para garantizar que las innovaciones del VAR son ruido blanco, se obtiene el rezago óptimo para cada una de las ecuaciones de las tres regiones. Este es de uno, así lo mostraron los criterios de información de Akaike, de Schwarz y de información de Hannan-Quinn, así como los

EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN LAS REGIONES DE MÉXICO

estadísticos de prueba LR modificado secuencial (cada prueba a un nivel del 5% de significancia), de error de predicción final. Así mismo, se obtuvieron las raíces del polinomio característico para las ecuaciones de las tres regiones de México. Se pudo observar que se encuentran dentro del círculo unitario, de lo que se deriva que todos cumplen la condición de estabilidad.

Se realizó el test de causalidad en el sentido de Granger por bloques. Se pudo observar que existe direccionalidad en las tres regiones, la cual va de las precipitaciones y la temperatura hacia la producción de maíz, por lo que ello valida que estadísticamente las dos primeras variables sí tienen incidencia sobre la producción de este cereal. Así también se analizaron los supuestos subyacentes a las innovaciones. El test de no autocorrelación se analizó con el Pormateau de los residuales multivariantes, mostrando que el supuesto se cumple por arriba del rezago 2. Así también se realizó el test de no correlación serial de multiplicador de Lagrange, el cual indica que no hay correlación serial en el rezago 1 y 2. Por último, el test de homocedasticidad multivariante indica que, el VAR de cada una de las tres regiones muestra homocedasticidad en las innovaciones.

Con datos de precipitación pluvial, de temperatura y de producción de maíz, por regiones, se han estimado los vectores autorregresivos que se presentan en la tabla 2, así como los estadísticos habituales. La variable LMVO representa el logaritmo de la producción de maíz, la variable PREG representa las precipitaciones, la variable TREG representa las temperaturas, durante el periodo de estudio, para cada una de las tres regiones consideradas.

Tabla 2. Estimación del Vector Autorregresivo para las regiones norte, centro y sur de México

Muestra (ajustada): 1987-2022									
Observaciones incluidas: 36 después de los ajustes									
Errores estándar en () y estadísticos t en []									
	Región norte			Región centro			Región sur		
	LMVOLR1	PREG1	TREG1	LMVOLR2	PREG2	TREG2	LMVOLR3	PREG3	TREG3
LMVOLR1(-1)	0.290 (0.227) [1.279]	8.156 (65.8870) [0.12380]	-0.495 (0.253) [-1.958]	0.178 (0.174) [1.021]	56.909 (87.125) [0.653]	0.360 (0.266) [1.353]	0.682 (0.121) [5.599]	294.636 (177.948) [1.655]	0.420 (0.410) [1.024]
PREG1(-1)	-0.0008 (0.00089) [-0.93569]	0.188 (0.25692) [0.73433]	0.001 (0.00099) [1.65106]	-4.06E-05 (0.00037) [-0.10886]	0.130384 (0.18617) [0.70037]	0.000423 (0.00057) [0.74305]	-2.33E-05 (0.00013) [-0.18236]	-0.215839 (0.18674) [-1.15583]	-1.94E-05 (0.00043) [-0.04490]
TREG1(-1)	0.163 (0.175) [0.931]	18.281 (50.969) [0.358]	0.520 (0.195) [2.654]	0.219 (0.066) [3.295]	65.014 (33.262) [1.954]	0.748 (0.101) [7.348]	0.088 (0.036) [2.432]	11.952 (53.054) [0.225]	0.696 (0.122) [5.686]
C	10.929 (4.094) [2.669]	1113.582 (1187.86) [0.937]	6.136 (4.566) [1.343]	8.732 (2.504) [3.486]	-1392.269 (1250.74) [-1.113]	-1.153 (3.828) [-0.301]	2.663 (1.602) [1.662]	-2989.294 (2338.60) [-1.278]	1.285 (5.398) [0.238]
R-cuadrado	0.148	0.106	0.841	0.377	0.246	0.747	0.680	0.108	0.594
R-cuadrado ajustado	-0.027	-0.078	0.809	0.321	0.177	0.725	0.651	0.027	0.557
Suma de los cuadrados de los residuos	2.696	226993.3	3.354	1.480	369028.3	3.457	0.397	846616.8	4.511
Error estándar de la ecuación	0.304	88.472	0.340	0.211	105.748	0.323	0.109	160.171	0.369
Estadístico F.	0.841	0.574	25.711	6.678	3.596	32.639	23.421	1.342	16.135
Log de la func. de verosimilitud	-4.433	-208.566	-8.366	7.047	-222.843	-8.648	31.368	-238.205	-13.571
Akaike AIC	0.635	11.975	0.853	-0.164	12.261	0.683	-1.479	13.092	0.949
Schwarz SC	0.943	12.283	1.161	0.009	12.435	0.857	-1.305	13.266	1.123
Media de la var. Dep.	13.406	507.886	20.977	15.703	859.462	19.218	15.297	1494.224	25.259
Desv. Estándar de la var. Dep.	0.300	85.185	0.778	0.257	116.628	0.617	0.185	162.440	0.556
Covarianza determinante del residuo (g. de l. ajustados)		37.769	N.A.	N.A.	44.027	N.A.	N.A.	32.180	N.A.
Covarianza determinante del residuo		19.743	N.A.	N.A.	31.236	N.A.	N.A.	22.831	N.A.
Log de la func. de verosimilitud		-206.936	N.A.	N.A.	-221.171	N.A.	N.A.	-215.372	N.A.
Criterio de información de Akaike		12.663	N.A.	N.A.	12.603	N.A.	N.A.	12.290	N.A.
Criterio de información de Schwarz		13.586	N.A.	N.A.	13.126	N.A.	N.A.	12.812	N.A.

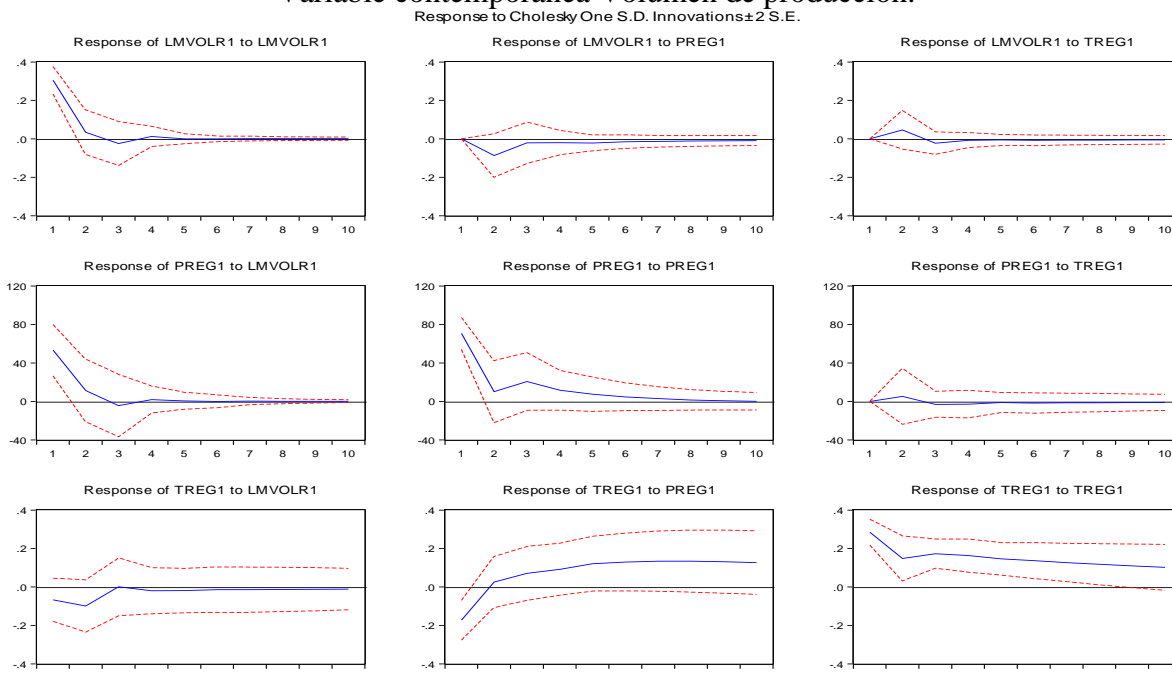
Fuente: Elaboración de los autores con datos de SIAP. (s.f.), CONAGUA (2024a), CONAGUA (2024b).

Nota: N.A.: No aplica.

Para la región norte, la función de respuesta al impulso del volumen de la producción de maíz, ante un shock en la innovación de esta (ecuación 2) se presenta la figura 1. Se puede observar que el efecto dura únicamente un año, en tanto que si el shock se presenta en la innovación de la ecuación de precipitación (ecuación 3), el efecto es nulo. Lo mismo ocurre si el shock se da en la innovación de la ecuación de temperatura (ecuación 4).

Un shock en la innovación de la precipitación (ecuación 3), sobre la precipitación, tiene un efecto que dura un año, al igual que el shock sobre la innovación de la precipitación (ecuación 3), sobre la temperatura. Si el shock es en la temperatura (ecuación 4), sobre la precipitación (ecuación 3), el efecto es nulo. Finalmente, si el shock es sobre la innovación de temperatura (ecuación 4), el efecto sobre ella misma dura siete años.

Figura 1. Función impulso-respuesta para la región norte.
Variable contemporánea Volumen de producción.

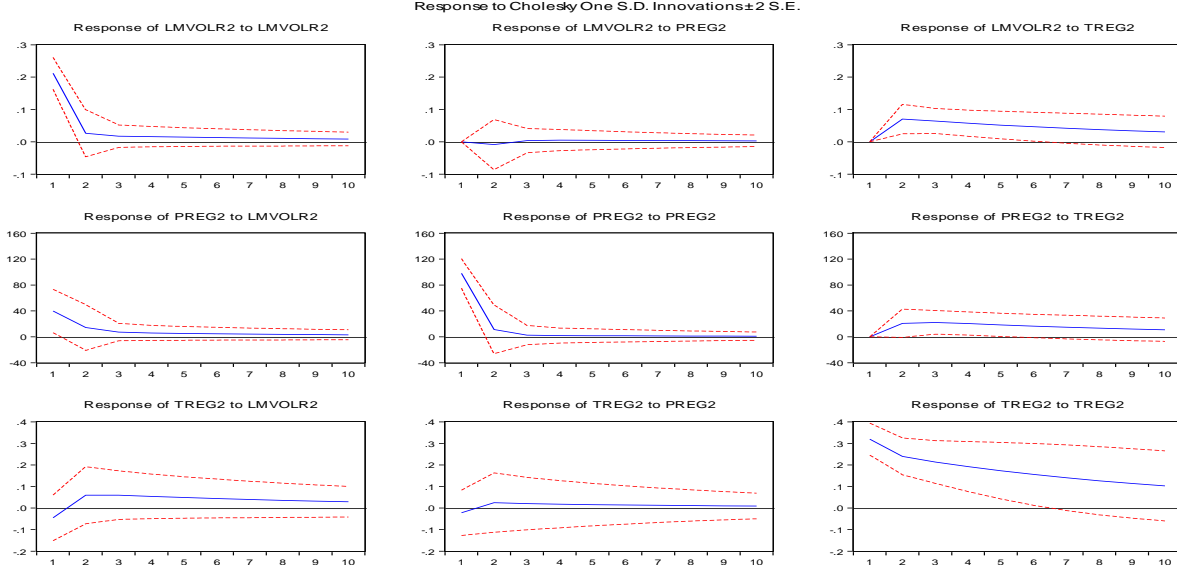


Fuente: Elaboración de los autores con datos de SIAP. (s.f.), CONAGUA (2024a), CONAGUA (2024b).

Para la región centro, la función de respuesta al impulso del volumen de la producción de maíz, ante un shock en la innovación de esta (ecuación 2), se presenta en la figura 2. Se puede observar que el efecto dura únicamente un año, en tanto que si el shock se presenta en la innovación de la ecuación de precipitación (ecuación 3), el efecto es nulo. No ocurre lo mismo si el shock se da en la innovación de la ecuación de temperatura (ecuación 4), ya que el efecto se manifiesta por los siguientes cinco años.

Un shock en la innovación de la precipitación (ecuación 3), sobre la precipitación, tiene un efecto que dura un año, con el mismo efecto y duración que si el shock es sobre la innovación de la precipitación (ecuación 3), sobre la temperatura. Si el shock es en la temperatura (ecuación 4), sobre la precipitación (ecuación 3), el efecto es nulo en el primer año, pero se refleja en los tres siguientes años. Finalmente, si el shock es sobre la innovación de temperatura (ecuación 4), el efecto sobre ella misma dura seis años.

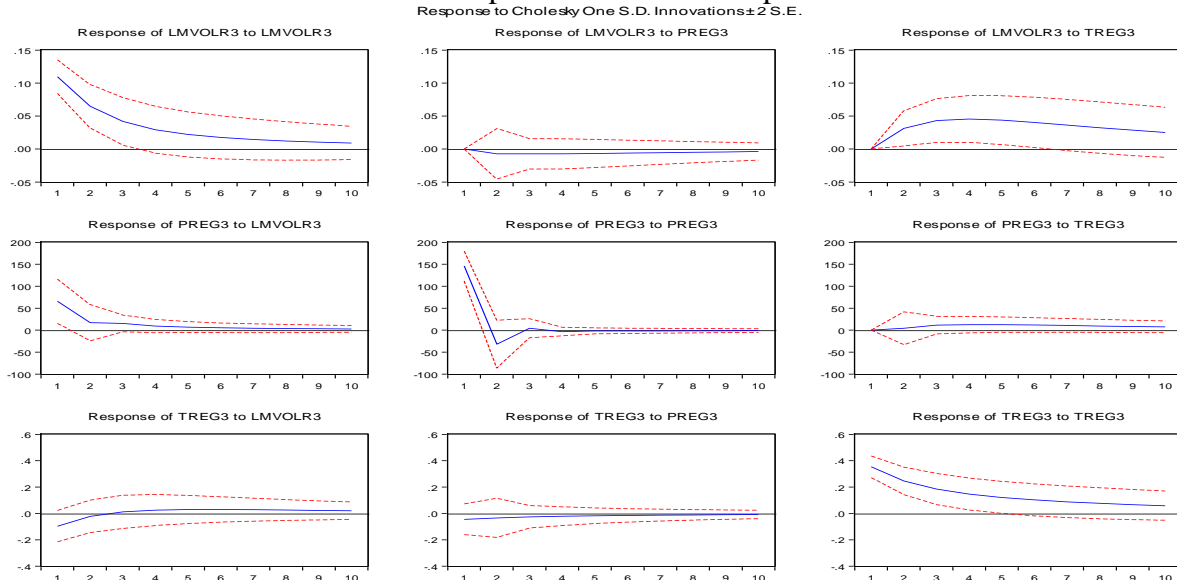
Figura 2. Función impulso-respuesta para la región centro.
Variable contemporánea Volumen de producción.



Fuente: Elaboración de los autores con datos de SIAP. (s.f.), CONAGUA (2024a), CONAGUA (2024b).

Para la región sur, la función de respuesta al impulso del volumen de la producción de maíz, ante un shock en la innovación de esta (ecuación 2), se presenta en la figura 3. Se puede observar que el efecto dura tres años, en tanto que si el shock se presenta en la innovación de la ecuación de precipitación (ecuación 3), el efecto es nulo. No ocurre lo mismo si el shock se da en la innovación de la ecuación de temperatura (ecuación 4), ya que el efecto se manifiesta por los siguientes seis años.

Figura 3. Función impulso-respuesta para la región sur.
Variable contemporánea Volumen de producción.



Fuente: Elaboración de los autores con datos de SIAP. (s.f.), CONAGUA (2024a), CONAGUA (2024b).

Un shock en la innovación de la precipitación (ecuación 3), sobre la precipitación, tiene un efecto que dura un año, con el mismo efecto y duración que si el shock es sobre la innovación de la precipitación (ecuación 3), sobre la temperatura. Si el shock es en la temperatura (ecuación 4), sobre la precipitación (ecuación 3), el efecto es nulo. Finalmente, si el shock es sobre la innovación de temperatura (ecuación 4), el efecto sobre ella misma dura cuatro años.

Las figuras anteriores permitieron observar la duración de los impactos en cada una de las regiones ante shocks en las innovaciones del sistema de ecuaciones del VAR.

En cuanto a la magnitud de los efectos ante los diferentes shocks, en la tabla 3, se observa que Como se puede apreciar en la tabla 3, un shock de una desviación estándar en la innovación de la ecuación de volumen de producción de la región norte tiene un efecto favorable de 0.3% en el siguiente año, no observando efecto alguno de los shocks en las innovaciones de las ecuaciones de la precipitación y la temperatura.

Para la región centro, el shock en la innovación de la ecuación del volumen de la producción sobre este tuvo un efecto de aumento de 0.21% en el primer año, no observándose efecto alguno de los shocks de las precipitaciones, en tanto que un shock en la ecuación de la temperatura tuvo un efecto de 0.000%, 0.070%, 0.064%, 0.057%, 0.052% sobre el volumen de producción en los próximos cinco años.

Respecto a la región sur, un shock en la innovación de la ecuación de volumen de producción tuvo un efecto de 0.110%, 0.065%, 0.042% en los siguientes tres años, no observándose efecto alguno de un shock en la innovación de las precipitaciones sobre el volumen de producción, en tanto que un shock en la ecuación de la temperatura el efecto sobre el volumen de producción fue de 0.000%, 0.031%, 0.043%, 0.046%, 0.044%, 0.040%, para los siguientes seis años, hasta diluirse.

Tabla 3. Función impulso-respuesta. Variable contemporánea Volumen de producción.

Periodo	Respuesta de LMVOLR1:			Respuesta de LMVOLR2:			Respuesta de LMVOLR3:		
	LMVOLR1	PREG1	TREG1	LMVOLR2	PREG2	TREG2	LMVOLR3	PREG3	TREG3
1	0.305 (-0.036)	0.000 (0.000)	0.000 (0.000)	0.212 (-0.025)	0.000 (0.000)	0.000 (0.000)	0.110 (-0.013)	0.000 (0.000)	0.000 (0.000)
2	0.034 (-0.058)	-0.087 (-0.057)	0.047 (-0.050)	0.026 (-0.036)	-0.009 (-0.039)	0.070 (-0.023)	0.065 (-0.016)	-0.007 (-0.019)	0.031 (-0.013)
3	-0.024 (-0.057)	-0.021 (-0.054)	-0.023 (-0.029)	0.017 (-0.017)	0.003 (-0.019)	0.064 (-0.019)	0.042 (-0.018)	-0.007 (-0.012)	0.043 (-0.017)
4	0.012 (-0.026)	-0.020 (-0.032)	-0.007 (-0.020)	0.016 (-0.016)	0.005 (-0.016)	0.057 (-0.020)	0.029 (-0.018)	-0.007 (-0.011)	0.046 (-0.018)
5	0.000 (-0.013)	-0.021 (-0.021)	-0.006 (-0.014)	0.014 (-0.015)	0.005 (-0.015)	0.052 (-0.021)	0.022 (-0.017)	-0.007 (-0.011)	0.044 (-0.019)
6	0.000 (-0.007)	-0.015 (-0.018)	-0.008 (-0.014)	0.013 (-0.014)	0.004 (-0.013)	0.046 (-0.022)	0.017 (-0.016)	-0.006 (-0.010)	0.040 (-0.019)
7	0.001 (-0.006)	-0.013 (-0.015)	-0.007 (-0.013)	0.012 (-0.013)	0.004 (-0.012)	0.042 (-0.023)	0.014 (-0.015)	-0.006 (-0.009)	0.036 (-0.019)
8	0.001 (-0.005)	-0.012 (-0.014)	-0.006 (-0.012)	0.011 (-0.012)	0.003 (-0.011)	0.038 (-0.024)	0.012 (-0.015)	-0.005 (-0.008)	0.032 (-0.019)

Fuente: Elaboración de los autores con datos de SIAP. (s.f.), CONAGUA (2024a), CONAGUA (2024b).

Notas: N. A. No aplica la direccionalidad. Desviación Estándar en (). En negrillas valores estadísticamente significativos al 5%.

Como se puede apreciar en la tabla 4, un shock de una desviación estándar en la innovación de la ecuación de la precipitación de la región norte tiene un efecto favorable de 70.67 mm. en el siguiente año, no observando efecto alguno del shock en la innovación de la ecuación de la temperatura.

Para la región centro, el shock en la innovación de la ecuación de la precipitación sobre esta tuvo un efecto de aumento de 97.98 mm. en el primer año, no observándose efecto alguno de la temperatura en el primer año, pero si para los siguientes cuatro, en magnitudes de 20.78, 22.25, 20.40, 18.40 milímetros, hasta diluirse. Respecto a la región sur, un shock en la innovación de la ecuación de precipitación tuvo un efecto de 145.99 mm. en el siguiente año, no observándose efecto alguno de la innovación de la temperatura.

Tabla 4. Función impulso-respuesta. Variable contemporánea Precipitación.

Periodo	Respuesta de PREG1:			Respuesta de PREG2:			Respuesta de PREG3:		
	LMVOLR1	PREG1	TREG1	LMVOLR2	PREG2	TREG2	LMVOLR3	PREG3	TREG3
1	N.A.	70.672	0.000	N.A.	97.986	0.000	N.A.	145.995	0.000
	N.A.	(-8.329)	(0.000)	N.A.	(-11.391)	0.000	N.A.	(-16.972)	(0.000)
2	N.A.	10.172	5.214	N.A.	11.350	20.788	N.A.	-32.044	4.232
	N.A.	(-16.130)	(-14.549)	N.A.	(-18.793)	(-10.907)	N.A.	(-27.193)	(-18.790)
3	N.A.	20.640	-3.024	N.A.	2.610	22.257	N.A.	4.345	11.259
	N.A.	(-14.979)	(-6.770)	N.A.	(-7.466)	(-9.118)	N.A.	(-10.867)	(-10.095)
4	N.A.	11.540	-2.917	N.A.	1.864	20.409	N.A.	-3.391	12.474
	N.A.	(-10.333)	(-7.158)	N.A.	(-5.821)	(-8.954)	N.A.	(-4.860)	(-9.494)
5	N.A.	7.426	-1.238	N.A.	1.673	18.406	N.A.	-1.694	12.466
	N.A.	(-8.913)	(-5.153)	N.A.	(-5.267)	(-8.965)	N.A.	(-3.354)	(-8.725)
6	N.A.	4.673	-1.845	N.A.	1.510	16.579	N.A.	-1.862	11.644
	N.A.	(-7.232)	(-5.276)	N.A.	(-4.756)	(-9.043)	N.A.	(-3.007)	(-8.256)
7	N.A.	2.915	-1.453	N.A.	1.361	14.932	N.A.	-1.610	10.579
	N.A.	(-6.174)	(-4.963)	N.A.	(-4.293)	(-9.116)	N.A.	(-2.733)	(-7.816)
8	N.A.	1.489	-1.332	N.A.	1.226	13.449	N.A.	-1.445	9.462
	N.A.	(-5.307)	(-4.736)	N.A.	(-3.878)	(-9.150)	N.A.	(-2.469)	(-7.397)

Fuente: Elaboración de los autores con datos de SIAP. (s.f.), CONAGUA (2024a), CONAGUA (2024b).

Notas: N. A. No aplica la direccionalidad. Desviación Estándar en (). En negrillas valores estadísticamente significativos al 5%.

La tabla 5 muestra que un shock de una desviación estándar en la innovación de la ecuación de la precipitación de la región norte, tiene un efecto desfavorable de -0.17 grados centígrados en la temperatura del siguiente año, mientras que un shock de una desviación estándar en la innovación de la ecuación de la temperatura tuvo un efecto sobre la temperatura de 0.28, 0.14, 0.17, 0.16, 0.14, 0.13, 0.12 grados para los siguientes años consecutivos. Para la región centro, el shock en la innovación de la ecuación de la precipitación sobre la temperatura, no tuvo efecto alguno sobre esta, aunque si en la temperatura, en magnitudes de 0.32, 0.23, 0.21, 0.19, 0.17, 0.15 grados centígrados para los próximos seis años, hasta diluirse.

Respecto a la región sur, un shock en la innovación de la ecuación de precipitación, no tuvo un efecto sobre la temperatura, aunque sí un shock en la ecuación de la temperatura sobre ella misma, en magnitudes de 0.35, 0.24, 0.18 y 0.14 grados Celsius, para los siguientes cuatro años.

Tabla 5. Función impulso-respuesta. Variable contemporánea Temperatura.

Periodo	Respuesta de TREG1:			Respuesta de TREG2:			Respuesta de TREG3:		
	LMVOLR1	PREG1	TREG1	LMVOLR2	PREG2	TREG2	LMVOLR3	PREG3	TREG3
1	N.A.	-0.173	0.285	N.A.	-0.022	0.320	N.A.	-0.045	0.354
	N.A.	(-0.052)	(-0.034)	N.A.	(-0.053)	(-0.037)	N.A.	(-0.058)	(-0.041)
2	N.A.	0.025	0.148	N.A.	0.025	0.239	N.A.	-0.034	0.247
	N.A.	(-0.067)	(-0.059)	N.A.	(-0.069)	(-0.043)	N.A.	(-0.074)	(-0.052)
3	N.A.	0.070	0.173	N.A.	0.020	0.213	N.A.	-0.026	0.185
	N.A.	(-0.070)	(-0.038)	N.A.	(-0.061)	(-0.050)	N.A.	(-0.043)	(-0.059)
4	N.A.	0.092	0.163	N.A.	0.018	0.192	N.A.	-0.021	0.147
	N.A.	(-0.068)	(-0.043)	N.A.	(-0.055)	(-0.058)	N.A.	(-0.036)	(-0.061)
5	N.A.	0.121	0.146	N.A.	0.016	0.173	N.A.	-0.018	0.121
	N.A.	(-0.071)	(-0.042)	N.A.	(-0.049)	(-0.066)	N.A.	(-0.029)	(-0.061)
6	N.A.	0.130	0.137	N.A.	0.014	0.156	N.A.	-0.015	0.102
	N.A.	(-0.075)	(-0.047)	N.A.	(-0.044)	(-0.072)	N.A.	(-0.025)	(-0.060)
7	N.A.	0.134	0.127	N.A.	0.013	0.140	N.A.	-0.013	0.088
	N.A.	(-0.078)	(-0.050)	N.A.	(-0.040)	(-0.076)	N.A.	(-0.022)	(-0.060)
8	N.A.	0.134	0.118	N.A.	0.012	0.126	N.A.	-0.012	0.076
	N.A.	(-0.081)	(-0.054)	N.A.	(-0.036)	(-0.079)	N.A.	(-0.020)	(-0.059)
Cholesky Ordering: LMVOLR1, PREG1, TREG1, LMVOLR1, PREG1, TREG1, LMVOLR1, PREG1, TREG1.									
Standard Errors: Analytic									

Fuente: Elaboración de los autores con datos de SIAP. (s.f.), CONAGUA (2024a), CONAGUA (2024b).

Notas: N. A. No aplica la direccionalidad. Desviación Estándar en (). En negrillas valores estadísticamente significativos al 5%.

Contar con una base de datos sobre producción de maíz de temporal, precipitaciones pluviales y temperatura, por entidad federativa, así como con una herramienta econométrica que permite identificar la relación entre estas variables, ha permitido estimar un vector autorregresivo, el cual hace posible identificar la relación dinámica entre ellas, al tiempo que con ello se ha podido identificar la duración de shocks sobre ellas, y la magnitud del efecto que ellos tienen. A la luz de los resultados, se puede concluir que, el efecto de un shock de temperatura en la región sur es de más larga duración en la producción de maíz, aunque de menor magnitud, seguido de la región centro. Así mismo, un shock en la temperatura tiene un efecto de más larga duración sobre la precipitación de la región centro. Por último, un shock en la temperatura tiene un efecto de más largo plazo sobre ella misma en la región norte, seguida de la región centro.

Lo anterior permite sugerir medidas mitigantes o que permitan revertir el cambio climático y, con ello, incidir sobre la producción agrícola, y de manera específica, sobre la producción de maíz de temporal. Es un conjunto de acciones que ameritan corresponsabilidad entre los actores: el Estado y la sociedad civil. Por parte del primero, desde inserción en los programas educativos de contenidos encaminados al desarrollo del entendimiento de la problemática multifactorial que este implica, hasta campañas activas de reforestación regional de regeneración de bosques y arboledas, acordes a las especies endémicas. Desde la sociedad civil, acciones como el cuidado de la flora endémica, o bien, su cultivo. O bien acciones que contribuyan a la reducción de emisiones de CO₂, de origen antropogénico, y que contribuyen al calentamiento global y sus implicaciones sobre el cambio climático.

Referencias

- Abidoeye, B. and Labuschagne M.** (2014). “The transmission of world maize price to South African maize market: a threshold cointegration approach”. *Agric. Econ.*, 45pp, 501-512.
- Adams, R. M., Hurd, B. H., Lenhart, S. and Leary, N.** (1998). “Effects of global climate change on agriculture: an interpretative review”. *Climate research*, 11(1), pp. 19-30.
- Ahmad, J., Alam, D. and Haseen, M. S.** (2011). “Impact of climate change on agriculture and food security in India”. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 4(2), pp. 129-137.
- Araujo-Enciso, S.** (2011). “Análisis de transmisión de precios entre los mercados de maíz mexicanos y el mercado estadounidense: métodos lineales y no lineales”. *Rev. Esp. Estud. Agrosoc. Pesq*, 229, pp. 39-78.
- Arce Romero, A., Monterroso R A. I., Gómez Díaz, J. D., Palacios Mendoza, M. Á., Navarro Salas, E. N., López Blanco, J. and Conde Álvarez, A. C.** (2020). “Crop yield simulations in Mexican agriculture for climate change adaptation”. *Atmósfera*, 33(3), pp. 215-231.
- Aydinalp, C. and Cresser, M.S.** (2008). “The Effects of Global Climate Change on Agriculture”. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 3, pp. 672-676.
- Backlund, P., Janetos, A. C. and Schimel, D. S.** (2008). *The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources and biodiversity in the United States*. US Climate Change Science Program. Vol. 4.
- Becerril Torres Osvaldo Urbano, Munguía Vázquez Gabriela, Del Rivero Maldonado Gerardo Enrique** (2024). “Relación dinámica entre temperatura y precipitación pluvial en las regiones de México”. En: **Sarmiento Franco, J. F.** (Coordinador). *Sostenibilidad y desarrollo regional de cara a los desafíos socioambientales*. Ciudad de México. Edit. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Económicas y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional. pp. 439-457.
- Brako Ntiamoah Evans, Li Dongmei, Appiah-Otoo Isaac, Ankrah Twumasi Martinson y Nyamah Yeboah Edmond** (2022). “Towards a sustainable food production: modelling the impacts of climate change on maize and soybean production in Ghana”. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, pp. 72777–72796. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20962-z>
- Calzadilla, A., Zhu, T., Rehdanz, K., Tol, R. S. and Ringler, C.** (2013). “Economywide impacts of climate change on agriculture in Sub-Saharan Africa “. *Ecological Economics*, 93, pp. 150-165.
- Chandio, A. A., Jiang, Y., Rehman, A. and Rauf, A.** (2020). “Short and long-run impacts of climate change on agriculture: an empirical evidence from China”. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 12(2), pp. 201-221.
- Chen, S., Chen, X. and Xu, J.** (2016). “Impacts of climate change on agriculture: Evidence from China “. *Journal of Environmental Economics and Management*, 76, pp. 105-124.
- Climate Change Center (2014).** *Climate Scenarios 2011-2040. District Haripur, Swabi, Attock and Chakwal, Pakistan*. The University of Agriculture Pakistan.

- CONAGUA** (2024a). *Precipitación promedio. Comportamiento de la lluvia promedio mensual a nivel estatal y nacional desde 1985 a la fecha medida a través de estaciones convencionales y automáticas*. Disponible en: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/precipitacion>. Fecha de consulta: 26 de junio de 2024.
- CONAGUA** (2024b). *Temperatura promedio. Comportamiento de la temperatura promedio a nivel mensual estatal y nacional desde 1985 a la fecha medida a través de estaciones convencionales y automáticas*. Disponible en: <https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/temperatura-promedio-excel>. Fecha de consulta: 26 de junio de 2024.
- Conde, C., Liverman, D., Flores, M., Ferrer, R., Araújo, R., Betancourt, E. and Gay, C.** (1998). "Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change". *Climate Research*, 9(1-2), pp. 17-23.
- Dimitriadis Dimitrios and Katrakilidis Constantinos** (2020). "An empirical analysis of the dynamic interactions among ethanol, crude oil and corn prices in the US market". *Ann Oper Res.* 294, pp. 47–57 <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2832-0>
- Donatti, C. I., Harvey, C. A., Martinez-Rodriguez, M. R., Vignola, R. and Rodriguez, C. M.** (2019). "Vulnerability of smallholder farmers to climate change in Central America and Mexico: current knowledge and research gaps". *Climate and Development*, 11(3), pp. 264-286.
- Dudu, H. and Cakmak, E. H.** (2018). "Climate change and agriculture: an integrated approach to evaluate economy-wide effects for Turkey". *Climate and Development*, 10(3), pp. 275-288.
- Dumrul, Y. and Kilicaslan, Z.** (2017). "Economic impacts of climate change on agriculture: Empirical evidence from ARDL approach for Turkey". *Journal of Business Economics and Finance*, 6(4), pp. 336-347.
- Engle, R. and Granger, C.** (1987). "Cointegration and error correction: representation, estimation, and testing". *Econometrica* 55, pp. 251-276.
- Escalante-Sandoval, C.** (2020). "Expected Impacts on Agriculture Due to Climate Change in Northern Mexico". *Water Resources of Mexico*, pp. 197-217.
- Fellino, P.L. and A.R. Salvacoin** (2007). Assessing the effect of climate change on rice and corn yields in selected provinces in the Philippines. 10th National Convention on Statistics (NCS).
- Galindo, L. M., Reyes, O. and Alatorre, J. E. E.** (2015). "Climate change, irrigation and agricultural activities in Mexico: A Ricardian analysis with panel data". *Journal of Development and Agricultural Economics*, 7(7), pp. 262-273.
- García Juárez, José de Jesús** (2017). *Predictor de precios de maíz en México*. Tesis de Doctorado. Colegio de Posgraduados.
- Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H. and Villers, L.** (2006). "Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico". *Climatic Change*, 79(3), pp. 259-288.
- Gil, J. M. y Albisu, L. M.** (1993). "Relaciones dinámicas y predicciones de los precios de los cereales mediante el uso de Vectores autoregresivos Bayesianos". *Investigación agraria Economía*. 8 (1), pp. 60-76.

- Goodwin, B. and Piggot, N.** (2001). “Spatial market integration in the presence of threshold effects”. *Am. J. Agric. Econ.* 83, pp. 302-317.
- Hellin, J., Bellon, M. R. and Hearne, S. J.** (2014). “Maize landraces and adaptation to climate change in Mexico”. *Journal of Crop Improvement*, 28(4), pp. 484-501.
- Iglesias, A., Garrote, L., Quiroga, S. and Moneo, M.** (2012). “A regional comparison of the effects of climate change on agricultural crops in Europe”. *Climatic change*, 112, pp. 29-46.
- IHS Global** (2016). *EViews 9 User’s Guide II. Chapter 39. Vector autoregression and error correction models*. EViews (version 9.0) Available at: www.eviews.com.
- Intergovernmental Panel on Climate Change** (2007). *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis*. Disponible en: https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch3s3-3-5.html Fecha de consulta: 28 de junio de 2024.
- Johansen, S.** (1991). The role of the constant term in cointegration analysis of non-stationary variables. Preprint N°1. Institute of Mathematical Statistics. University of Copenhagen. Copenhagen. Dinamarca.
- Kane, S., Reilly, J. and Tobey, J.** (1992). “An empirical study of the economic effects of climate change on world agriculture”. *Climatic change*, 21(1), pp. 17-35.
- Karimi, V., Karami, E. and Keshavarz, M.** (2018). “Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran”. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), pp. 1-15.
- Kinnucan, H. and Forker, O.** (1987). “Asymmetry in farm-retail price transmission for major dairy products”. *Am. J. Agric. Econ.* 69, pp. 285-292.
- Kurukulasuriya, Pradeep and Rosenthal, Shane.** (2013). *Climate Change and Agriculture: A Review of Impacts and Adaptations*. Environment department papers; no. 91. Climate change series. World Bank, Washington, DC. <http://hdl.handle.net/10986/16616> License: CC BY 3.0 IGO.”
- Liao Etienne Xiaoli, Trujillo-Barrera Andrés and Wiggins Seth** (2016). “Price and volatility transmissions between natural gas, fertilizer, and corn markets”. *Agricultural Finance Review*. 76(1), pp. 151-171. DOI 10.1108/AFR-10-2015-0044
- Liverman, D. M.** (2019). “Global warming and Mexican agriculture: Some preliminary results”. *In Economic Issues in Global Climate Change*, pp. 332-352. CRC Press.
- Lizama-Fuentes Verónica, Cabas-Monje Juan y Velasco-Fuenmayor Julia** (2017). “Transmisión de precios del maíz entre Chile y Argentina“. *Rev. Fac. Agron.* 34, pp. 78-102. Enero-Marzo.
- López García María del Rosario** (2020). *Predicción del precio de maíz en México*. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma Chapingo.
- López-García María del Rosario, Martínez-Damián Miguel Ángel y Arana-Coronado José Jaime** (2021). “Predicción del precio del maíz en México“. *Agrociencia* 55, pp. 733-746. DOI: <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i8.2665>

- Lysias, Magodora Tatenda** (2018). “Causality analysis and physioeconomic impacts of climate change on maize production in south Africa”. Tesis de Master of Science in Agriculture. University of KwaZulu-Natal. Pietermaritzburg.
- Malhi, G. S., Kaur, M. and Kaushik, P.** (2021). “Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review”. *Sustainability*, 13(3), pp. 1318.
- Mendelsohn, R.** (2014). “The impact of climate change on agriculture in Asia”. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(4), pp. 660-665.
- Molua, E. L.** (2007). “The economic impact of climate change on agriculture in Cameroon”. World Bank Policy Research Working Paper, (4364).
- Murray-Tortarolo, G. N., Jaramillo, V. J., and Larsen, J.** (2018). “Food security and climate change: the case of rainfed maize production in Mexico”. *Agricultural and Forest Meteorology*, 253, pp. 124-131.
- Mundo-Molina, M.** (2015). “Climate change effects on evapotranspiration in Mexico”. *American Journal of Climate Change*, 4(2), pp. 163-172.
- Myers, R. and Jayne, T.S.** (2011). “Multiple regime spatial price transmission with an application to maize markets in Southern Africa”. *Am. J. Agric. Econ.* 94, pp. 174-188.
- Ngaira, J. K. W.** (2007). “Impact of climate change on agriculture in Africa”. *Scientific Research and Essays*, 2(7), pp. 238-243.
- Parry, M. L. and Carter, T. R.** (1989). “An assessment of the effects of climatic change on agriculture”. *Climatic change*, 15, pp. 95-116.
- Parry, M.L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M. and Fischer, G.** (2004). “Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socioeconomic scenarios”. *Global Environ. Change.* 14, pp. 53-67. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2003.10.003>
- Peri, M.** (2017). “Climate variability and the volatility of global maize and soybean prices”. *Food Sec.* 9, pp. 673–683 <https://doi.org/10.1007/s12571-017-0702-2>
- Pörtner H. O. and Peck M. A.** (2010). “Climate change effects on fishes and fisheries: towards a cause-and-effect understanding”. *Journal of fish biology*. First published: 23 September <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02783.x>
- Reilly, J. and Hohmann, N.** (1993). “Climate change and agriculture: the role of international trade”. *The American Economic Review*, 83(2), pp. 306-312.
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M. et al.** (2017). “Forest disturbances under climate change”. *Nature Clim Change.* 7, pp. 395–402 <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>
- Shakoor Usman, Rashid Mudassar, Saboor Abdul, Khurshid Nabila, Husnain Zuhair y Rehman Abdul** (2017). “Maize Production Response to Climate Change in Pakistan: A Time Series Assessment”. *Sarhad Journal of Agriculture.* 33(22). DOI: 10.17582/journal.sja/2017/33.2.320.330
- Short Frederick T. and Neckles, Hilary A.** (1999). “The effects of global climate change on seagrasses”. *Aquatic Botany*, 63(3–4), Pages 169-196. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(98\)00117-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(98)00117-X).

- SIAP** (s.f.). *Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Disponible en: https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/ Recuperado el 19 de Mayo de 2025.
- Silva, J. A., Monroy Becerril, D. M. and Martínez Díaz, E.** (2023). "Effects of climate change on water resources in Mexico". *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 34(2), 408-427.
- Sims, C.A.**, (1980). Macroeconomics and reality. *Econometrica*. 48(1), pp. 1-48.
- Smit, B. and Cai, Y.** (1996). "Climate change and agriculture in China". *Global environmental change*, 6(3), pp. 205-214.
- Tao, F., Yokozawa, M., Hayashi, Y., and Lin, E.** (2003). "Changes in soil moisture in China over the last half-century and their effects on agricultural production". *Agric. Meteorol.* 118, pp. 251-261. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(03\)00107-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(03)00107-2)
- Tol R., S. J.** (2009). "The Economic Effects of Climate Change". *Journal of Economic Perspectives*, American Economic Association, vol. 23(2), pp. 29-51, Spring. DOI: 10.1257/jep.23.2.29
- Trinh, T. A.** (2018). "The impact of climate change on agriculture: findings from households in Vietnam". *Environmental and resource economics*, 71(4), pp. 897-921.
- Ureta, C., González, E. J., Espinosa, A., Trueba, A., Piñeyro-Nelson, A. and Álvarez-Buylla, E. R.** (2020). "Maize yield in Mexico under climate change". *Agricultural Systems*, 177, 102697.
- Waiguru Muriuki Samuel, Kyalo Mung'atu Joseph and Gichuhi Waititu Antony** (2018). "Structural Vector Auto Regressive Analysis of Maize Prices and Extreme Weather Events". *International Journal of Data Science and Analysis*. November 4(5), pp. 79-88. DOI: 10.11648/j.ijdsa.20180405.12