

Enfoques econométricos para estimar impactos económicos del cambio climático en la agricultura: revisión de la literatura

Econometric approaches to estimate economic impacts of climate change on agriculture: literature review

Nubia Zoé Lara-Rodríguez ^a | Ana Cecilia Travieso-Bello ^b

Recibido: 02 de febrero de 2022.

Aceptado: 16 de marzo de 2022.

^a Estudiante de la Maestría en Economía Ambiental y Ecológica, Facultad de Economía, Universidad Veracruzana, Xalapa, México. Contacto: zoelarus28@gmail.com

^b Doctora en Ciencias. Universidad Veracruzana, Facultad de Economía, Xalapa, México. Contacto: atravieso@uv.mx | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6518-6585>

RESUMEN: El cambio climático afecta el desarrollo y rendimiento de los cultivos, con posibles impactos negativos en la seguridad alimentaria y la economía. Por ello, se analizaron los estudios reportados en la literatura, que emplearon análisis econométricos a nivel microeconómico, para estimar los impactos económicos del cambio climático en la agricultura. Se encontró un mayor uso del modelo Ricardiano, en comparación con el modelo de función de producción. Ambos emplean variables independientes climáticas, de suelo y socioeconómicas. Las variables respuesta más frecuentes fueron ingresos netos agrícolas y valor de la tierra, para el modelo Ricardiano, así como producción y rendimiento, para el modelo de función de producción. Se discutieron las fortalezas y debilidades de estos modelos. La mayoría de los estudios reportaron que el incremento de la temperatura y la disminución de la precipitación tienen impactos negativos en la agricultura. Esto representa un gran desafío para la adaptación al cambio climático.

Palabras clave: Modelos econométricos; impactos económicos; cambio climático; agricultura; revisión de la literatura.

ABSTRACT: *Climate change affects crop development and yields, with possible negative impacts on food security and the economy. For this reason, the studies reported in the literature, which used econometric analyzes at the microeconomic level, were analyzed to estimate the economic impacts of climate change on agriculture. A greater use of the Ricardian model was found, compared to the production function model. Both use independent climatic, soil, and socioeconomic variables. The most frequent response variables were agricultural net income and land value, for the Ricardian model, as well as production and yield, for the production function model. The strengths and weaknesses of these models were discussed. Most of the studies reported that the increase in temperature and the decrease in precipitation have negative impacts on agriculture. This represents a great challenge for adaptation to climate change.*

Keywords: *Econometric models; economic impacts; climate change; agriculture; literature review.*

Introducción

La agricultura se relaciona con el cambio climático (CC) de dos formas opuestas, ya que por una parte, actúa como una fuente emisora de gases de efecto invernadero, contribuyendo positivamente con el CC y por otra, opera como captador o sumidero de carbono, disminuyendo su concentración en la atmósfera y por tanto, reduciendo el CC (IPCC, 2019). Asimismo, el sector agrícola es uno de los más vulnerables ante los efectos que ocasiona el CC, debido a su alta dependencia de múltiples condiciones ambientales (FAO, 2016a).

El CC afecta de manera física, biológica y bioquímica el desarrollo y la producción de las plantas cultivadas, a través de las alteraciones que ocasiona en los patrones estacionales de temperatura y precipitación; en la intensidad y frecuencia de eventos extremos; en la degradación de la biodiversidad; en la prevalencia de plagas y patógenos. Además, contribuye con la erosión y la desertificación del suelo, entre otros cambios en los ciclos naturales (FAO, 2016a; IPCC, 2019; CDKN, 2020).

Por tanto, la agricultura recibe impactos del CC que se reflejan directamente en el rendimiento o producción de los cultivos (FAO, 2016b), en la aptitud y amplitud del territorio para cultivar (Monterroso et al., 2007; González-Santos et al., 2016) y en la economía de las poblaciones humanas (Auffhammer, 2018). Como consecuencia general del CC, es probable que ocurra una reducción en la cantidad y calidad de los alimentos, amenazando la seguridad alimentaria y la economía. Esto se traduce en una posible disminución en los ingresos de los productores y un incremento potencial en los precios de productos agrícolas, debido a su escasez (FAO, 2016b).

Desde la década de 1970, el surgimiento del CC como campo de estudio motivó el interés por estimar las posibles consecuencias de un clima cambiante en diversos sectores económicos, entre ellos el agrícola (Auffhammer, 2018). Los estudios del análisis del impacto del CC sobre la agricultura pueden clasificarse en dos grandes tipos: los que examinan las respuestas agrícolas y los que cuantifican o estiman los impactos económicos (Fernández y Blanco, 2015). Éstos últimos, se centran en conocer las repercusiones económicas, las cuales representan una importante fracción en la economía (BM, 2019).

Se han utilizado principalmente dos enfoques para la estimación de los impactos económicos del CC en la agricultura, los cuales son el agronómico-económico y el econométrico. El enfoque agronómico-económico emplea modelos de cultivos bien calibrados, con datos de experimentos controlados, que evalúan el efecto de diferentes climas o niveles de dióxido de carbono simulados. Posteriormente aplican modelos económicos para predecir la producción agregada de cultivos, precios e ingresos netos, utilizando los rendimientos obtenidos de los modelos agronómicos. Este enfoque es costoso ya que requiere de experimentos controlados, además sobrestima los daños y no incluye la adaptación de los agricultores al CC (Mendelsohn et al., 1994; Adams et al., 1998; Mendelsohn y Dinar 1999).

Los modelos econométricos han sido utilizados para estimar el impacto económico del CC en la agricultura, ya que permiten analizar información registrada sobre producción, rendimiento de los cultivos, ingresos netos (variables de respuesta) en función de variables explicativas (variables independientes) de tipo climáticas, físicas y socioeconómicas (Gay et al., 2006; Jarvis et al., 2010). Además, Algunos modelos econométricos incorporan las medidas de adaptación al CC implementadas por los agricultores (Kurukulasuriya y Mendelsohn, 2007). Por otra parte, en la mayoría de los casos, existen datos secundarios disponibles, que permiten estimar los impactos esperados por el CC sobre la producción agrícola en un menor tiempo y a un bajo costo, en comparación con los estudios que emplean datos primarios.

Sin embargo, el análisis econométrico presenta algunos inconvenientes porque no captura los efectos del dióxido de carbono, no considera los cambios en los costos, ni en el uso de insumos. Además, se dificulta el control de variables entre distintos tipos de labranza o riego; pueden generarse sesgos porque solo se modela una parte del proceso, dejando fuera la estimación de los daños secundarios o costos relacionados a las plagas; o porque se ignoran los ajustes en los precios de mercado, entre algunas otras situaciones (McCarl et al., 2016). No obstante, el análisis econométrico ha sido ampliamente utilizado, por ello en este artículo se analizan los principales enfoques y modelos teórico-econométricos aplicados a nivel microeconómico, para abordar los impactos económicos del CC en la agricultura. Además, se discuten las fortalezas y debilidades de los modelos Ricardiano y de función de producción.

1. Enfoques y modelos teórico-econométricos

Se han empleado diversos enfoques teóricos que utilizan la econometría como método de análisis para abordar el impacto económico del CC en la agricultura, entre los cuales destacan el enfoque espacial y el enfoque estructural o de función de producción, que se describen a continuación.

Cabe mencionar que se han realizado estudios que emplean el análisis econométrico para estimar el impacto económico del CC en la agricultura, pero que no declararon un enfoque en particular (por ejemplo, Meza y Yúnez 2015; Gebregewergs y Hadush, 2017; Mourad et al., 2017; Agri et al., 2020), por ello no se analizaron en este trabajo.

1.1. Enfoque espacial

El enfoque espacial analiza los cambios en el modelo de producción en el espacio, es decir, los efectos de las variables que caracterizan un territorio sobre el valor o precio de la tierra. Por tanto, la variabilidad climática que se observa espacialmente afecta el valor de la tierra (Adams et al., 1999; Fernández y Blanco, 2015). Este enfoque emplea el modelo Ricardiano que debe su nombre a David Ricardo (1772-1823), quien estableció en la teoría económica que la renta de la tierra (valor) refleja la productividad neta de la misma (Kurukulasuriya y Mendelsohn, 2007; Mendelsohn et al., 2009). Según este modelo, la renta o valor de la tierra se considera el ingreso neto derivado del mejor uso que se puede hacer de ésta. Por tanto, el valor de la finca refleja el valor presente de la productividad neta futura (Bawayelaazaa et al., 2016).

El modelo Ricardiano asume que cada agricultor elige para cada unidad de tierra el cultivo y los insumos (condiciones exógenas) que maximizan los ingresos, los cuales varían entre zonas climáticas, por lo que considera la adaptación de los agricultores (Mendelsohn et al., 2009; Hernández et al., 2014; Onoja y Achike, 2014).

Este modelo se representa matemáticamente (**Ecuación 1**), considerando que los ingresos netos de las tierras agrícolas (π) reflejan la productividad neta y costos netos (Mendelsohn et al., 2009).

$$\pi = \sum P_i Q_i (X, F, Z) - \sum P_x X \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde π corresponde a los ingresos netos de las tierras agrícolas, P_i al precio del cultivo i , X a un vector de insumos comprados, F a un vector de variables climáticas, Z a un vector de otras variables de control como suelo y acceso a los mercados, P_x a un vector de precios de insumos.

Posteriormente se calcula el valor de la tierra (V), donde r es la tasa de interés (**Ecuación 2**)

$$V = \pi/r \quad (\text{Ecuación 2})$$

En los modelos Ricardianos es común la integración del modelo de regresión, utilizando la función loglineal y las variables climáticas en términos cuadráticos (Mendelsohn et al., 2009).

Una variante del modelo Ricardiano es el Modelo Estructural Ricardiano, que permite relacionar las probabilidades de elección de los cultivos con variables climáticas y las distintas características de los productores, donde la elección de cultivos es mutuamente excluyente (Seo y Mendelsohn, 2007; Kurukulasuriya y Mendelsohn, 2007). Este modelo permite conocer la respuesta de los agricultores ante los cambios en la temperatura y la precipitación (Galindo et al., 2015a).

1.2 Enfoque estructural o de función de producción

La función de producción permite predecir el rendimiento neto de los cultivos ante variaciones climáticas, ya que incorpora factores climáticos como la temperatura y la precipitación, estimando los impactos del CC en la producción (Raza y Amhad, 2015; Zaied y Zouabi, 2015; López y Hernández, 2016).

La función de producción agrícola se puede expresar con base en variables endógenas (trabajo, capital, fertilizantes y otros insumos), exógenas (climáticas) y las que representan la habilidad o capacidad de los agricultores (**Ecuación 3**), donde Qt es la producción agropecuaria o rendimiento por hectárea, el subíndice t indica el tiempo considerado, m las características de los agricultores, z las variables exógenas, x las variables endógenas. Después de estimar las funciones de producción, se pueden introducir los escenarios de CC, variando la temperatura y precipitación en el modelo y de esta manera es posible calcular los impactos sobre la variable dependiente (Hernández et al., 2014).

$$Q_t = f(m, z, x) \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Adicionalmente es posible estimar los beneficios económicos que obtendría un agricultor que produce n número de cultivos, de acuerdo a la ecuación 4, donde p_j son los precios del producto j , Q_{jt} es la producción o rendimiento del producto j en el tiempo t , M_t corresponde al vector de las características de los agricultores en el tiempo t , Z_t es el vector de variables exógenas en el tiempo t , X_{jt} es el vector de variables endógenas necesarias para el cultivo j en el tiempo t , w_j son los precios de los insumos para el cultivo j (Hernández et al., 2014).

$$P = \sum p_j Q_{jt} (M_t, Z_t, X_{jt}) - w_j X_{jt} \quad j = 1, 2, \dots, n \text{ cultivos} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

2. Método

Se realizó una revisión de la literatura de libre acceso en internet, en inglés y español, publicada en revistas científicas o en reportes oficiales de instituciones expertas en el tema a nivel internacional (e.g., FAO, Banco Mundial), que abordaran la estimación de los impactos económicos del CC en la agricultura, con el empleo de modelos econométricos. Inicialmente se buscaron en internet fuentes secundarias con información general del tema y en base a ésta, se localizaron las fuentes primarias más relevantes, por tanto, se incorporaron estudios de un rango de tiempo indeterminado.

Posteriormente, se compilaron artículos científicos en las bases de datos multidisciplinarias Scielo (<https://www.scielo.org/>), CORE (<https://core.ac.uk/>) y en Google Académico, con énfasis en los últimos cinco años. Se utilizó la fórmula de búsqueda: ("econometric model" AND "climate change"

AND “agriculture”) AND year: [2015 TO 2020], en inglés y en español. Luego se descartaron los estudios que no correspondían a los modelos espacial o estructural. Posteriormente se analizaron los documentos seleccionados, considerando los objetivos del trabajo, la escala de análisis, los modelos empleados, así como los principales resultados obtenidos.

3. Resultados y discusión

Se revisaron 27 publicaciones que emplearon el análisis econométrico para la estimación de los impactos del CC en la agricultura a nivel microeconómico. El 77.8% de los estudios empleó solo el enfoque espacial y 18.5 % solo el estructural (**Tablas 1 y 2**). Además, un estudio combinó ambos enfoques, considerándolos complementarios (Ordaz et al., 2010).

3.1. Modelos Ricardiano y de función de producción

Los estudios revisados mostraron que los enfoques espacial y de función de producción se han empleado en distintos países (81.8%) y regiones (18.2%, que solo emplean el modelo Ricardiano) del mundo para la estimación de los impactos económicos del CC en la agricultura (Tabla 1 y 2). Solo se encontró un estudio a nivel local (Gay et al., 2006).

El modelo Ricardiano ha sido el más usado, coincidiendo con lo reportado por otros autores (De Salvo et al., 2014; López y Hernández, 2016). Muchas investigaciones se han llevado a cabo en países cálidos, con énfasis en África (14 estudios, equivalentes a 51.8%), hallazgo similar al de Lobell y Burke (2010).

La mayoría de los estudios que emplearon el modelo Ricardiano (72.7%) analizaron la agricultura en general, mientras que todos los estudios que usaron el modelo de función de producción analizaron cultivos específicos (**Tablas 1 y 2**).

Es importante destacar que el modelo Ricardiano es adecuado para el análisis de la agricultura en general y no se recomienda para cultivos específicos, ya que cada cultivo tiene su propia función de ingresos netos en relación con el clima y la función Ricardiana integra todas las opciones de ingresos netos máximos en el conjunto de cultivos (Seo y Mendelsohn, 2007).

Sin embargo, algunos autores emplearon el modelo Ricardiano para los principales cultivos (Onoja y Achike, 2014; Galindo et al., 2015a; Tumwine et al., 2019; Tun Oo et al., 2020) o cultivos particulares (Bawayelaazaa et al., 2016; Williams et al., 2017), sin considerar la función específica de ingresos netos en relación con el clima de cada cultivo.

Tabla 1
Características principales de los estudios que aplican el modelo Ricardiano

Autores, año, lugar y escala	Objetivo	Cultivo	Escenario de CC Efectos marginales Elasticidades	Tipo, (fuente de datos), análisis estadístico y (VC significativas)
Schlenker et al., 2006 (E.U.A.)* (N)	Estimar una ecuación hedónica para el valor tierras agrícolas.	Agricultura	EscCC	Transversales (sec) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp <i>sq</i> , Prec <i>sq</i>)
Deressa, 2007 (Etiopía)* (N)	Evaluar el impacto económico del CC en los agricultores.	Agricultura	EscCC y Uniforme	Transversal (prim) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp <i>sq</i> , Prec <i>sq</i>)
Eid et al., 2007 (Egipto)* (N)	Evaluar y predecir los impactos potenciales del CC en la agricultura.	Agricultura	EscCC	Transversal (prim) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp <i>sq</i> , Prec <i>sq</i>)
Jain, 2007 (Zambia)* (N)	Evaluar los impactos económicos del aumento de la temperatura, disminución de la precipitación y escorrentía en las actividades agrícolas.	Agricultura	Uniforme	Transversal (prim) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp <i>sq</i> , Prec <i>sq</i> , índice de humedad <i>sq</i>)
Kabubo-Mariara y Karanja, 2007 (Kenya)* (N)	Analizar el efecto del CC a largo plazo en la agricultura.	Agricultura	EscCC	Transversales (prim) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp <i>sq</i> , Prec <i>sq</i>)
Kurukulasuriya y Mendelsohn, 2007 (África)* (REG)	Estimar la relación entre los ingresos netos de los cultivos y el clima actual y predecir las afectaciones futuras del CC.	Agricultura	EscCC y Uniforme	Transversales (sec) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp <i>sq</i> , Prec <i>sq</i>)
Mano y Nhemachena, 2007 (Zimbabwe)* (N)	Cuantificar y predecir los posibles impactos económicos del CC en la agricultura, identificar medidas de adaptación que están utilizando los agricultores.	Agricultura	EscCC y Uniforme	Transversales (prim) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp <i>sq</i> , Prec <i>sq</i>)
Molua y Lambi, 2007 (Camerún)* (N)	Evaluar el impacto del CC en los sistemas agrícolas actuales y en el futuro.	Agricultura	EscCC y Uniforme	Transversales (prim) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp <i>sq</i> , Prec <i>sq</i>)
Seo y Mendelsohn, 2007 (Latinoamérica) (REG)	Estimar la vulnerabilidad de la agricultura latinoamericana ante el CC.	Agricultura	EscCC	Transversales (prim) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp <i>sq</i> , Prec <i>sq</i>)
Maddison et al., 2007 (11 países de África) (REG)	Estimar el impacto del CC en la agricultura y las adaptaciones de los agricultores a las condiciones climáticas.	Agricultura	EscCC	Transversales (sec) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp <i>sq</i> , Prec <i>sq</i> , escorrentía)

Autores, año, lugar y escala	Objetivo	Cultivo	Escenario de CC Efectos marginales Elasticidades	Tipo, (fuente de datos), análisis estadístico y (VC significativas)
Mendelsohn et al., 2009 (México) (N)	Medir el impacto del clima en la agricultura.	Agricultura	EscCC	Transversales (sec) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp <i>sq</i> , Prec <i>sq</i> , interacción entre Temp y Prec)
Ordaz et al., 2010 (Costa Rica) (N), FP	Examinar los posibles efectos CC sobre la producción agropecuaria.	Producción agropecuaria	EscCC	Transversales (sec) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp <i>sq</i>)
Van-Passel et al., 2012 (15 países de Europa) (REG)	Contribuir al estudio de los efectos del CC en la agricultura.	Agricultura	EscCC	Transversales (sec) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp <i>sq</i> , Prec <i>sq</i>)
Onoja y Achike, 2014 (Nigeria) (N)	Evaluar los efectos del cambio climático en la productividad de los cultivos herbáceos.	Maíz, arroz, yuca, ñame y frijol caupí	Elasticidades	Transversales (prim) Regresión múltiple (Temp, Prec)
Galindo et al., 2015a (Perú) (N)	Captar la influencia del CC en la selección endógena de cultivos por parte de los agricultores y los impactos sobre su ingreso esperado.	Alfalfa, arroz, café, maíz amarillo, maíz amiláceo, papa, plátano, uva y yuca	EscCC	Transversal (sec) Logit multinomial y regresión múltiple (Temp, Prec)
Galindo et al., 2015b (México) (N)	Analizar los impactos económicos potenciales del CC en las actividades agrícolas.	Agricultura	Uniforme	Datos panel (sec) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp <i>sq</i> , Prec <i>sq</i>)
Odozi, 2015 (Nigeria) (N)	Cuantificar los daños y beneficios económicos del CC.	Agricultura	EscCC	Transversales (sec) Regresión múltiple (Temp, Temp <i>sq</i> , Prec <i>sq</i> , interacción entre Temp y Prec)
Bawayelaazaa et al., 2016 (Ghana) (N)	Investigar los impactos económicos de los cambios en las variables climáticas.	Maíz y sorgo	Efectos marginales	Transversales (prim) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp <i>sq</i> , Prec <i>sq</i>)
Williams et al., 2017 (Ghana) (N)	Examinar el impacto económico de un clima cambiante en el cultivo de piña.	Piña	Efectos marginales	Transversales (prim) Regresión múltiple (Prec, Temp <i>sq</i>)
Stojcheska et al., 2019 (Macedonia) (N)	Evaluar la adaptación de los agricultores ante el impacto del CC.	Agricultura	EscCC	Transversal (sec) Regresión múltiple (Índice de aridez de <i>de Martone</i>)
Tumwine et al., 2019 (Uganda) (N)	Examinar el efecto de precipitación y temperatura en el rendimiento de los cultivos.	Plátano, maíz, cacahuate, yuca y frijol	Elasticidades	Panel (sec) Modelo Tobit (Temp, Prec)

Autores, año, lugar y escala	Objetivo	Cultivo	Escenario de CC Efectos marginales Elasticidades	Tipo, (fuente de datos), análisis estadístico y (VC significativas)
Tun Oo et al., 2020 (Myanmar) (N)	Estimar los determinantes climáticos y no climáticos de la rentabilidad de las granjas y evaluar los impactos proyectados del CC sobre el rendimiento agrícola.	Arroz, cacahuete, sésamo, maíz, gandules, garbanzo, girasol	EscCC	Transversales (prim) Regresión múltiple (Temp, Prec, Temp sq, Prec sq)

Nota: Investigaciones realizadas en el proyecto Cambio Climático y Agricultura en África, financiado por Global Environment Facility (GEF) y World Bank (WB). Escala del estudio: Regional (REG), incluye varios países de un continente; Nacional (N). Escenario de cambio climático: Modelo y escenarios de cambio climático (EscCC), Cambios uniformes en el clima (Uniforme). Fuente de datos de valor de la tierra, producción, o rendimiento de los cultivos: (sec) sólo emplea datos secundarios; (prim) emplea datos primarios y secundarios. Variables climáticas (VC): temperatura (Temp), precipitación (Prec), término cuadrático (sq). FP: Emplea el modelo Ricardiano y el de Función de producción. Fuente: elaboración propia basada en la información de cada artículo.

Los estudios que emplearon el modelo Ricardiano por lo general utilizaron datos transversales (90.9%) y el 50% combinó el uso de datos secundarios con los primarios, obtenidos de entrevistas o cuestionarios aplicados a los agricultores. Casi todos emplearon el análisis de regresión múltiple. En contraste, todos los estudios que usaron el modelo de función de producción emplearon únicamente fuentes secundarias. Además, 80% de los mismos utilizaron datos panel, incorporando diversos tipos de análisis estadísticos, mientras que solo un estudio empleó series de tiempo (Tablas 1 y 2).

Tabla 2
Características principales de los estudios que aplican el modelo de función de Producción

Autores, año, lugar y escala	Objetivo	Cultivo	Escenario de CC	Tipo, (fuente de datos), análisis estadístico y (VC significativas)
Gay et al., 2006 (México, Veracruz) (L)	Explorar la relación entre las variables producción de café, clima y economía con el fin de estimar los impactos potenciales del CC.	Café	EscCC	Series de tiempo (sec) Regresión múltiple (Temp)
Raza y Ahmad, 2015 (Pakistán) (N)	Analizar el impacto del CC en la productividad del algodón.	Algodón	Efectos marginales	Panel (sec) Modelo efectos fijos y modelo efectos variables (Temp, Prec, Temp sq, Prec sq)

Autores, año, lugar y escala	Objetivo	Cultivo	Escenario de CC	Tipo, (fuente de datos), análisis estadístico y (VC significativas)
Zaied y Zouabi, 2015 (Tunisia) (N)	Modelar los efectos del CC a largo plazo en la producción anual de aceitunas, utilizando desarrollos recientes en técnicas econométricas.	Aceituna	Elasticidades	Panel (sec) Regresión, Mínimos cuadrados completamente modificados (Temp, Prec)
Hussain y Bangash, 2017 (Pakistán) (N)	Estimar el impacto de la temperatura y la precipitación en la productividad de cultivos en cuatro zonas agroecológicas.	Arroz, trigo, maíz, algodón y caña de azúcar	Efectos marginales	Panel (sec) Técnicas de mínimos cuadrados de panel: Efectos fijos y aleatorios (Temp, Prec)
Shayanmehr et al., 2020 (Irán) (N)	Investigar el impacto del CC en el rendimiento del trigo de las tierras secas.	Trigo	EscCC	Panel (sec) Mínimos cuadrados generalizados factibles de tres pasos (RDist, Temp, Prec, Temp sq, Prec sq)

Escala del estudio: Nacional (N), Local (L), incluye entidades federativas y municipios. Modelo y escenarios de cambio climático (EscCC). Fuente de datos de valor de la tierra, producción, o rendimiento de los cultivos: (sec) sólo emplea datos secundarios. Variables climáticas (VC): temperatura (Temp), precipitación (Prec), término cuadrático (sq), Índice de Reconocimiento de Sequía (RDist).

Fuente: elaboración propia basada en la información de cada artículo.

La variable de respuesta más utilizada en los modelos Ricardianos fueron ingresos netos agrícolas y valor de la tierra o la finca, que son de tipo económico monetario. Esto representa una ventaja en comparación con los modelos de función de producción, donde la variable respuesta fue el rendimiento o la producción (expresada, por ejemplo, en toneladas por hectárea), las cuales deben transformarse a unidades monetarias.

Es importante destacar que la mayoría de los trabajos reportan ingresos netos agrícolas y valor de la tierra o de la finca en porcentaje de variación, lo que facilita la comparación. En contraste, algunos trabajos expresan la variable respuesta en las unidades monetarias del país (Gay et al., 2006; Eid et al., 2007; Bawayelaazaa et al., 2016; Williams et al., 2017), aspecto que dificulta la comparación entre países y entre fechas (**Tablas 3 y 4**).

Tabla 3

Impactos económicos del cambio climático en la agricultura, estimados mediante modelos econométricos que emplean cambios uniformes en el clima y/o que sólo reportan efectos marginales y elasticidades

Autores, año, (lugar), (modelo), variable de respuesta	Cambios uniformes en el clima Efectos marginales Elasticidades	Impactos estimados
Deressa, 2007 (Etiopía) (RIC) <i>Ingresos netos/ha</i>	Escenarios Uniformes Temp: +2.5°C Temp: +5°C Prec: -7% Prec: -14%	-0.0000132% -0.0000299% -0.03249% -0.03247%
Jain, 2007 (Zambia) (RIC) <i>Ingresos netos/ha</i>	Escenarios Uniformes Temp: +1°C (nov-dic) Temp: +1°C (ene-feb) Prec: -20% (ene-feb) Escorrentía: +1cm	-243% +237% -252% +2.5%
Kurukulasuriya y Mendelsohn, 2007 (África) (RIC) <i>Ingresos netos/ha e</i> <i>Ingreso neto total</i>	Escenarios Uniformes Temp: +2.5°C Temp: + 5°C Prec: -7% Prec: -14%	Dependiendo del acceso al riego (irrigada, no irrigada, irrigada + no irrigada): De -16% a +9% De -30% a +23% De -1.4% a -6% De -11% a -11%
Mano y Nhemachena, 2007 (Zimbabwe) (RIC) <i>Ingresos netos/ha e</i> <i>Ingreso neto total</i>	Escenarios Uniformes Temp: +2.5°C Temp: + 5°C Prec: -7% Prec: -14%	Dependiendo del acceso al riego (irrigada, no irrigada, irrigada + no irrigada): De -31% a -3% De -36% a -1% De -27% a -2% De -28% a -2%
Molua y Lambi, 2007 (Camerún) (RIC) <i>Ingresos netos/ha e</i> <i>Ingreso neto total</i>	Escenarios Uniformes Temp: +2.5°C Temp: + 5°C Prec: -7% Prec: -14%	-5.5 % -11.3 % -6.5 % -15.3%
Onoja y Achike, 2014 (Nigeria) (RIC) <i>Ingresos netos</i>	Elasticidades +1% en temp +1% en prec	-8.22% +1.20%
Galindo et al., 2015b (México) (RIC) <i>Ingresos netos</i>	Escenarios Uniformes Temp: +2.5°C Prec: -10% prec	Dependiendo del acceso al riego (irrigada, no irrigada, irrigada + no irrigada): De -32% a -10% De -8.9% a -4.3%
Bawayelaazaa et al., 2016 (Ghana) (RIC) <i>Ingresos netos</i>	Efectos marginales +1°C temp +1mm prec	Dependiendo del cultivo y estación del año: De US -168.29 a US +111.47 De US -140.42 a US +155.95

Autores, año, (lugar), (modelo), variable de respuesta	Cambios uniformes en el clima Efectos marginales Elasticidades	Impactos estimados
Williams et al., 2017 (Ghana) (RIC) <i>Ingresos netos/ha</i>	Efectos marginales +1°C temp +1mm prec	- GHS 7890/ha + GHS 775.77/ha
Tumwine et al., 2019 (Uganda) (RIC) <i>Retornos de fincas agrícolas</i>	Elasticidades +1% en temp +1% en prec	Dependiendo del cultivo: De -2.02% a +0.543% De -0.08% a +0.155%
Raza y Ahmad, 2015 (Pakistán) (FP) <i>Rendimiento</i>	Efectos marginales +1°C temp +1mm prec	Dependiendo de la región (provincia): -2.6% y +2.26% -0.64% y +0.16%
Zaied y Zouabi, 2015 (Tunisia) (FP) <i>Producción</i>	Elasticidades +1% en temp +1% en prec	Dependiendo de la región: -0.05% a -5.84% -0.01% y +0.71%
Hussain y Bangash, 2017 (Pakistán) (FP) <i>Rendimiento</i>	Efectos marginales +1°C temp +1mm prec	Dependiendo de la región y del cultivo: +61.71kg/ha a +1719.9kg/ha +5.58kg/ha a +77.3kg/ha

Temp: temperatura, Prec: precipitación. Variable de respuesta: se subraya la reportada en columna de impactos estimados. Impactos estimados: Valores positivos significan ganancias y valores negativos, pérdidas. Las unidades empleadas son: % de variación con respecto al dato/año base de cada estudio, unidades monetarias del país o peso/superficie. US: dólar estadounidense. GHS: Moneda de Ghana. Fuente: elaboración propia basada en la información de cada artículo.

Los estudios revisados mostraron que ambos modelos (Ricardiano y función de producción) utilizaron variables independientes climáticas, de suelo y socioeconómicas. Sin embargo, la evaluación del impacto del CC se abordó de diversas formas. El 51.8% (11 artículos del modelo Ricardiano, 2 de función de producción, 1 que emplea ambos modelos) introducen en el modelo econométrico ajustado, valores de las variables climáticas calculados mediante modelos y escenarios de CC (EscCC). Estos incluyeron diversos modelos de circulación global (MCG) y varios escenarios de CC, así como distintos años (**Tablas 1, 2 y 4**), lo que limita la comparación entre los estudios.

Además, 7.4% consideraron cambios uniformes en el clima (2 artículos del modelo Ricardiano), mientras que 14.8% (4 artículos del modelo Ricardiano) combinaron los EscCC con cambios uniformes en el clima (**Tablas 1, 2, 3 y 4**). Los cambios uniformes en el clima se refieren a un conjunto simple de cambios en las variables climáticas, por ejemplo, +2.5°C en la temperatura y -7% en la precipitación (Kurukulasuriya & Mendelsohn, 2007).

En contraste, siete estudios (4 Ricardianos y 3 de función de producción) correspondientes al 25.9% (**Tablas 1, 2 y 3**), únicamente reportaron la relación de cambio entre la variable de respuesta y las variables climáticas, reportando efecto marginales o elasticidades. El efecto marginal es el cambio de la variable de respuesta ante el aumento de una unidad de las variables climáticas (e.g., +1°C de temperatura o +1mm de precipitación), mientras que la elasticidad es la variación porcentual de la variable de respuesta en relación con las variables climáticas, determinada por el valor de los coeficientes de la pendiente del modelo econométrico ajustado (Seo y Mendelsohn, 2008).

Todos los estudios reportaron valores significativos de las variables climáticas o índices calculados a partir de dichas variables (índice de humedad, índice de aridez, índice de reconocimiento de sequía). En la mayoría de los casos la temperatura y la precipitación resultaron significativas, tanto en sus formas lineales como cuadráticas. Pocos trabajos analizaron la interacción de ambas variables, que también resultó significativa (Tablas 1 y 2).

Los estudios que emplearon cambios uniformes en el clima o que reportaron efectos marginales y elasticidades para estimar los impactos económicos del CC en la agricultura (**Tabla 3**), en su mayoría encontraron que el incremento de la temperatura reduce los ingresos netos. Sin embargo, quienes analizaron la temperatura por estación del año (Jain, 2007; Bawayelaazaa et al., 2016) reportaron que un incremento de la temperatura reduce los ingresos netos en ciertas estaciones del año, mientras que en otras lo aumenta. Esto mismo ocurrió en uno de los casos que elaboró modelos independientes para las tierras irrigadas y las no irrigadas (Kurukulasuriya y Mendelsohn, 2007). Por tanto, los resultados de las investigaciones que no diferencian las estaciones del año pudieran estar sesgados.

Por otra parte, algunos estudios que consideraron el incremento de la temperatura en 1°C (**Tabla 3**) reportaron tanto incrementos como reducciones en las variables respuesta (rendimiento o retornos), asociadas a las diferencias entre regiones (Raza y Ahmad, 2015) y/ o entre cultivos (Hussain y Bangash, 2017; Tumwine et al., 2019).

En el caso de la precipitación, se presentaron modelos contrastantes (**Tabla 3**), ya que algunos estudios consideraron la reducción de la precipitación (-7%, -10%, -14%) y otros el incremento de la misma (+1 mm, +1%). La reducción de la precipitación (-7%, -10%, -14%) en todos los casos disminuyó los ingresos netos (Deressa, 2007; Jain, 2007; Kurukulasuriya y Mendelsohn, 2007; Mano y Nhemachena, 2007; Molua y Lambi, 2007; Galindo et al., 2015b). En el mismo sentido, el aumento de la precipitación mostró un incremento de los ingresos netos (Onoja y Achike, 2014; Williams et al., 2017) y el rendimiento (Hussain y Bangash, 2017). Sin embargo, otros estudios reportaron que el aumento de la precipitación puede incrementar o disminuir: 1) los ingresos netos en función de la estación del año (Bawayelaazaa et al., 2016); 2) el retorno de las fincas de acuerdo a los cultivos (Tumwine et al., 2019); 3) el rendimiento (Raza y Ahmad, 2015) y la producción (Zaied y Zouabi, 2015), de acuerdo a diferencias entre las distintas áreas de estudio (provincias, regiones).

De manera particular, los estudios que diferenciaron las fincas irrigadas (con riego) de las no irrigadas (temporal o seco) encontraron en las fincas irrigadas un menor impacto en los ingresos netos por el incremento de la temperatura y la reducción de la precipitación (Kurukulasuriya y Mendelsohn, 2007; Mano y Nhemachena, 2007; Galindo et al., 2015b). Estos autores siguieron la recomendación de Schlenker et al. (2005), quienes mencionaron que los efectos del CC en tierras

con irrigación deben modelarse de forma independiente a las tierras no irrigadas, debido a que el riego es una decisión del agricultor.

Por otra parte, los impactos económicos del CC en la agricultura, estimados mediante modelos econométricos que emplean modelos y escenarios de CC son muy diversos (**Tabla 4**). Algunos estudios reportaron solo impactos negativos o solo impactos positivos, mientras que otros reportaron ambos. Esto se debe a la diversidad de MCG y de escenarios empleados, así como a las diferencias de las fincas en cuanto a tamaño, acceso a riego, potencial productivo (determinado por el tipo de suelo y factores hidrológicos), tipos de cultivo, ubicación geográfica, entre otros factores.

Tabla 4

Impactos económicos del cambio climático en la agricultura, estimados mediante modelos econométricos que emplean modelos y escenarios de cambio climático

Autores, año, (lugar), (modelo), variable de respuesta	Modelo, escenario y año de proyección	Impactos estimados
Schlenker et al., 2006 (E.U. A.) (RIC) <i>Ingresos netos/ha</i>	HadCM3 Periodos 2020-2049 y 2070-2099 Escenarios B1, B2, A2 y A1F1	Dependiendo de escenario: De -10.46% a -24.50% (2020-2049) De -27.37% a -68.54% (2070-2099)
Deressa, 2007 (Etiopía) (RIC) <i>Ingresos netos/ha</i>	CGM2, HadCM3, PCM Años 2050 y 2100	Dependiendo el MCG: De +0.00000281% a +0.00003289% (2050) De -0.00004626% a -0.00002743% (2100)
Eid et al., 2007 (Egipto) (RIC) <i>Ingresos netos/ha</i>	MAGICC/SCENGEN, GCM Año 2050	Dependiendo del MCG, acceso al riego, forma funcional del modelo econométrico, maquinaria pesada: De -\$1453.41/ha a +\$543.46/ha
Kabubo-Mariara y Karanja, 2007 (Kenya) (RIC) <i>Ingresos netos/acre</i>	CCC y GFDL Año 2030	Dependiendo del MCG y del potencial productivo de las zonas (medio-bajo, alto, medio-bajo+alto): De +5% a +117.43%
Kurukulasuriya y Mendelsohn, 2007 (África) (RIC) <i>Ingresos netos/ha e Ingreso neto total</i>	CCC, CCSR y PCM Escenario A1 Años 2020, 2060, 2100	Dependiendo del MCG y del acceso al riego (irrigada, no irrigada, irrigada + no irrigada): De -16% a +63% (2020) De -119% a +61.5% (2060) De -40% a +68% (2100)

Autores, año, (lugar), (modelo), variable de respuesta	Modelo, escenario y año de proyección	Impactos estimados
Mano y Nhemachena, 2007 (Zimbabwe) (RIC) <i>Ingresos netos/ha e Ingreso neto total</i>	CGM2, HadCM3 y PCM Escenario A2 Años 2050 y 2100	Dependiendo del MCG y del acceso al riego (irrigada, no irrigada, irrigada + no irrigada): De -91% a -8% (2050) De -119% a -30% (2100)
Molua y Lambi, 2007 (Camerún) (RIC) <i>Ingresos netos/ha e Ingreso neto total</i>	CGM2, CSIRO2, ECHAM, HadCM3, PCM Escenarios A2 y B2 Años 2020, 2050 y 2100	Dependiendo del escenario y del MCG: De -27.3% a +5.8% (2020) De -42% a +12.5% (2050) De -50% a 37.5% (2100)
Seo y Mendelsohn, 2007 (Latinoamérica) (RIC) <i>Ingresos netos/ha y valor de la tierra</i>	CCC, CCSR, PCM Escenario A1 Años 2020, 2060, 2100	Dependiendo del MCG, del acceso al riego (irrigada, no irrigada, irrigada + no irrigada) y del tamaño de la granja (chica, grande): De -64% a +56% (2020) De -38% a +52% (2060) De -65% a +104% (2100)
Maddison et al., 2007 (11 países de África) (RIC) <i>Valor de la tierra/ha</i>	Oficina Meteorológica del Reino Unido, Escenario A1 sin estabilización Año 2050	Dependiendo el país: De -1.3% a -30.5%
Mendelsohn et al., 2009 (México) (RIC) <i>Valor de la tierra/ha</i>	MIMR, HadCM3, PCM Año 2100	Dependiendo del MCG, del acceso al riego (irrigada, no irrigada, irrigada + no irrigada): De -39.8% a 62.3%
Ordaz et al., 2010 (Costa Rica) FP: <i>Ingreso por alquiler</i> RIC: <i>Producción (% del PIB)</i>	ECHM, GFDL, HADGEM Escenarios A2, B2 Años 2020, 2030, 2050, 2070, 2095, 2100	FP: Dependiendo del escenario, MCG, año, variable, cultivo y tasa de descuento: De -0.014% a +8.92% RIC: Dependiendo el MCG y del año: De -0.5% a -5.9%
Van-Passel et al., 2012 (15 países de Europa)(RIC) <i>Valor de las granjas</i>	HadleyCM3, ECHO-G, NCAR PCM Escenario A2 Año 2100	Dependiendo del MCG y del país: De -8% a -44%
Galindo et al., 2015a (Perú) (RIC) <i>Ingresos condicionales esperados</i>	ACCESS y CNRM-CM5 Escenario RCP 8.5 Año 2070	Dependiendo del MCG y del cultivo: -8% a -13%
Odozi, 2015 (Nigeria) (RIC) <i>Valor de la granja</i>	HadleyCM3 Año 2050	Dependiendo la zona agrícola: De -8.24% a -62.79%

Autores, año, (lugar), (modelo), variable de respuesta	Modelo, escenario y año de proyección	Impactos estimados
Stojcheska et al., 2019 (Macedonia) (RIC) <i>Rendimiento unitario/ha</i>	Escenarios del Ministerio de planeación Ambiental y física (MEPP) Años 2025 y 2050	Dependiendo del escenario: De -71.2% a -5.7% (2025) De -222.8% a -23.1% (2050)
Tun Oo et al., 2020 (Myanmar) (RIC) <i>Ingresos netos/ha</i>	PCM, CGCM3, CSIRO Escenario A2 Años 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079, 2080-2099	Dependiendo del MCG, año, la estación del año y variable climática: De -4.3% a -46%
Gay et al., 2006 (México, Veracruz) (FP) <i>Producción e ingreso neto</i>	Escenarios probabilísticos calculados por los autores en base a las tendencias climáticas observadas para el año 2020	-34% (producción) -\$9765.34 (ingreso neto)
Shayanmehr et al., 2020 (Irán) (FP) <i>Rendimiento medio y Variabilidad del rendimiento</i>	RCP 2.6, 4.5, 8.5 Periodo 2041-2070	Dependiendo de la región (provincia), forma funcional del modelo econométrico y RCP: De -0.28 a +7.65%

Modelo: Ricardiano (RIC), Función de producción (FP). Variable de respuesta: se subraya la reportada en columna de impactos estimados. RCP: Rutas representativas de concentración de Gases Efecto Invernadero. Modelos de Circulación Global (MCG). Valores positivos significan ganancias y valores negativos, pérdidas. Se reporta en términos de % de variación con respecto al dato/año base de cada estudio o en unidades monetarias del país.

Fuente: elaboración propia basada en la información de cada artículo

La mayoría de los autores coinciden en que los escenarios más severos tendrán un impacto negativo mayor en la agricultura (**Tabla 4**). Además, los estudios que analizaron varios años encontraron un incremento del impacto negativo a través del tiempo, por ejemplo, la reducción del rendimiento es mucho mayor en el año 2050 en comparación con el 2025 (Stojcheska et al., 2019). Algunos autores reportaron que la irrigación reduce el impacto del CC en la agricultura (Eid et al., 2007; Seo y Mendelsohn, 2007), por lo que esta práctica se considera una medida de adaptación.

Por otra parte, los cambios a largo plazo en las temperaturas tendrán un impacto negativo en los ingresos netos, que serán más pronunciados en las zonas con potencial productivo medio-bajo en comparación con las zonas de potencial alto. Además, se esperan algunas ganancias en las zonas de potencial alto por incrementos leves de la temperatura con una precipitación contante (Kabubo-Mariara y Karanja, 2007).

También se encontraron diferencias de acuerdo a la ubicación geográfica. Por ejemplo, un estudio en 11 países de África mostró impactos negativos del CC en el valor de la tierra en todos los países, con una mayor severidad en los más cálidos (Maddison et al., 2007). Además, se observaron diferencias entre zonas agrícolas de Nigeria (Odozi, 2015) y entre provincias de Irán (Shayanmehr et al., 2020).

En resumen, la mayoría de los estudios reportaron que el incremento de la temperatura y la reducción de la precipitación tienen impactos negativos en la agricultura. Esto afectará la seguridad alimentaria, principalmente en los países más pobres, representando un gran desafío para la adaptación de los agricultores, así como para el diseño de políticas públicas en materia de CC.

Las políticas para enfrentar los efectos adversos del CC en la agricultura, según Eid et al. (2007), deben enfocarse en el manejo de cultivos, el manejo del agua y la gestión de la tierra. Se han detectado estrategias de adaptación de los

agricultores al CC como el uso de cultivos resistentes a la sequía, la siembra en seco y temprana, modificaciones en las fechas de siembra y el empleo de riego ante condiciones climáticas adversas (Mano y Nhemachena, 2007).

3.2. Fortalezas y debilidades de los modelos econométricos

Los modelos econométricos son herramientas valiosas que permiten analizar la relación entre la temperatura y la precipitación con variables económicas como la producción, el rendimiento, el valor de la tierra y los ingresos netos. La selección del modelo econométrico para estimar los impactos económicos del CC en la agricultura debe considerar la congruencia entre los objetivos del modelo y su nivel analítico, con los siguientes aspectos: objetivo del estudio, escala de análisis y disponibilidad de datos (NU y CEPAL, 2015). También es importante tener en cuenta las fortalezas y debilidades que se discuten a continuación.

El modelo función de producción fue el más utilizado para la estimación de los efectos económicos del CC en la agricultura hasta el año 1994, cuando Mendelsohn et al. (1994), propusieron el modelo Ricardiano, que enfatiza en los efectos a nivel nacional o subnacional. Estos autores criticaron el modelo de función producción, porque sobreestima los efectos del CC ya que no incorpora adecuadamente la adaptación de los agricultores (López y Hernández, 2016). Los modelos con una mayor calibración y regionalización brindan más información, pero reducen su alcance ya que no podrán trasladarse a otra región o a otro cultivo. En contraste, los modelos que brindan información de los impactos a una escala de región o país, pueden enmascarar los impactos locales (NU y CEPAL, 2015).

El modelo Ricardiano permite estimar el impacto directo del CC en unidades con un alto grado de desagregación como las fincas y granjas. Sin embargo, debe aplicarse en localidades mayores a 200 km², situación que puede limitar el uso de esta herramienta a nivel local. Además, los datos empleados deben ser representativos de las unidades geográficas consideradas (Ordaz et al. 2010; Hernández et al., 2014). Este modelo, a diferencia del de función de producción, incluye la respuesta de adaptación de los agricultores al clima (Kurukulasuriya y Mendelsohn, 2007).

Por ejemplo, considerando la temperatura actual, la decisión óptima del productor puede ser cultivar un producto determinado; sin embargo, en la medida en que la temperatura se incrementa, la rentabilidad marginal de dicho producto decrece, hasta que alcanza un punto donde se vuelve negativa. En este momento, la decisión óptima puede ser la adopción de un cultivo nuevo, que se adapte a temperaturas mayores. Esta misma lógica aplica a cultivos sensibles a la precipitación pluvial (Ordaz et al., 2010). No obstante, la crítica a este modelo plantea que la gran variabilidad de condiciones climáticas de un año a otro, puede limitar las respuestas de adaptación exitosa de los agricultores (Adams et al., 1998; Reilly, 1999).

El modelo de función de la producción, a diferencia del Ricardiano, permite identificar los umbrales climáticos a partir de los cuales la producción agrícola puede ser disminuida o potenciada. Esto permite estimar los valores óptimos de temperatura y precipitación, donde se da la máxima producción, incluso para diferentes estaciones del año. Sin embargo, son escasos los estudios (Ordaz et al. 2010; Gay et al., 2006) que aprovechan esta ventaja del modelo.

Los modelos econométricos por lo general usan datos disponibles de fuentes secundarias (e.g., de organismos internacionales o gubernamentales). Esto reduce el tiempo y los costos de la investigación, facilita la generalización de los resultados, así como el monitoreo de las variables. Sin embargo, en ocasiones los datos secundarios pueden encontrarse a un nivel agregado, por tanto, se deben seleccionar los que mejor se adapten a la teoría, estimación entre variables o modelo teórico planteado (Elizalde, 2012). Además, en algunos casos se carece de información sistemática, por ello algunas investigaciones generan sus propios datos (datos primarios) para la construcción de los modelos, asumiendo los costos que esto implica.

Los análisis con datos transversales son estáticos, ya que se refieren a un momento de tiempo determinado (De Salvo et al., 2014; Odozi, 2015), estos son los que se emplean con mayor frecuencia en los modelos Ricardianos. En contraste, el uso de modelos con datos panel permite obtener coeficientes constantes en el tiempo (Tumwine et al., 2019) y elimina las distorsiones causadas por la correlación entre las variables climáticas y las estrategias de los agricultores tratadas explícitamente en el modelo, como el caso del riego (De Salvo et al., 2014). Aunque se ha reconocido la necesidad de adaptar el modelo Ricardiano a los datos panel, la principal limitación es la ausencia de datos disponibles para años consecutivos, que proporcionen estadísticas a largo plazo (De Salvo et al., 2014).

Además, en ocasiones el modelo Ricardiano promedia de forma excesiva las variables climáticas a escala temporal, espacial o sectorial, por tanto, tiende a subestimar los impactos del CC, que se comportan de forma no lineal (Hanemann y Dale, 2006).

Generalmente las variables climáticas se incluyen en los modelos como factores exógenos. Sin embargo, otros autores consideran la temperatura como factor endógeno porque la agricultura genera gases efecto invernadero que incrementan la temperatura. Por tanto, para controlar la endogeneidad utilizan las variables latitud y longitud, que se encuentran correlacionadas con la temperatura (Husnain et al., 2018).

Por último, es importante destacar que aunque los modelos han evolucionado en los últimos años, aún existen algunas limitaciones que no se han resuelto. No obstante, se ha observado un incremento en el número de estudios que emplean el modelo Ricardiano.

4. Conclusiones

Los enfoques espacial y estructural que emplean los modelos Ricardianos y de función de producción, respectivamente, han sido los más utilizados para estimar los impactos económicos del CC, a pesar de sus limitaciones. Estos se han aplicado en diversos países y regiones.

El modelo que se ha empleado con mayor frecuencia es el Ricardiano, sin embargo, este se recomienda solo para el análisis de la agricultura en conjunto y no para cultivos específicos. Este modelo, en la mayoría de los casos, ocupa datos transversales, por ello el análisis es estático. En contraste, el modelo de función de producción generalmente usa datos panel que permiten un análisis dinámico, así como la obtención de coeficientes estables en el tiempo. Aunque es posible adaptar el modelo Ricardiano a los datos panel, la principal barrera es la disponibilidad de datos.

Los modelos Ricardiano y de función de producción han empleado varios modelos y escenarios de CC, así como cambios uniformes en el clima para estimar el impacto del cambio climático en la agricultura. En algunos casos, solo consideraron impactos marginales o elasticidades. Esta diversidad metodológica dificulta la comparación, sin embargo, la mayoría de los estudios reportaron que el incremento de la temperatura y la reducción de la precipitación tienen impactos negativos en la agricultura. Estos impactos varían de acuerdo a diversos factores como son la ubicación geográfica, el potencial productivo, la estación del año, el acceso a riego y el tipo de cultivo.

La selección del modelo para estimar los impactos económicos del CC en la agricultura debe considerar el objetivo del estudio, su escala de análisis y la disponibilidad de datos, de acuerdo con los objetivos del modelo, su nivel analítico, así como sus fortalezas y debilidades. El uso de ambos modelos de forma complementaria para el análisis de la agricultura en conjunto, puede ser una opción para potenciar las ventajas que ofrece en lo individual cada uno de ellos.

El impacto del cambio climático tiene importantes implicaciones en la producción agrícola y los ingresos de los agricultores, así como en la seguridad alimentaria por la escasez y el alza de los precios de los productos agrícolas. Por tanto, representa un gran desafío para la adaptación de los agricultores, así como para el diseño de políticas públicas en materia de CC.

Referencias

- Adams, R., Hurd, B., Lenhart, S., & Leary, N.** (1998). Effects of global climate change on world agriculture: an interpretive review. *Climate Research*, 11, 19–30.
<https://doi.org/10.3354/cr011019>
- Adams, R. M., Hurd, B. H., Reily, J.** (1999). A review of impacts to U.S agricultural resources. Pew Center on Global Climate Change. <https://www.c2es.org/document/agriculture-global-climate-change-a-review-of-impacts-to-u-s-agricultural-resources/>
- Agri, E. M., Mallo, E. R., Alfred, D. N., & Garba, A.** (2020). Impact of climate Change on Agriculture and Food Security in Nigeria. *Socialsci Journal*, 6, 41–59.
<https://core.ac.uk/reader/322551784>
- Auffhammer, M.** (2018). Quantifying Economic Damages from Climate Change. *Journal of Economic Perspectives*, 32(4), 33–52. <https://doi.org/10.1257/jep.32.4.33>
- Bawayelaazaa, N., A., Donkor, E., Aidoo, R., Saaka B., S., Naab, J., Nutsugah, S., Bayala, J., & Zougmore, R.** (2016). Economic Impacts of Climate Change on Cereal Production: Implications for Sustainable Agriculture in Northern Ghana. *Sustainability*, 8(8), 724.
<https://doi.org/10.3390/su8080724>
- BM, Banco Mundial.** (2019). Agricultura y alimentos. Entendiendo la Pobreza.
<https://www.bancomundial.org/es/topic/agriculture/overview>
- CDKN, Alianza Clima y Desarrollo.** (2020). El Informe Especial del IPCC sobre Cambio Climático y la Tierra. CDKN. <https://bit.ly/3iKOU0w>
- De Salvo, M., Begalli, D., & Signorello, G.** (2014). The Ricardian analysis twenty years after the original model: Evolution, unresolved issues and empirical problems. *Journal of Development and Agricultural Economics*, 6 (3), 124-131. <https://doi.org/10.5897/jdae2013.0534>
- Deressa, T. T.** (2007). Measuring The Economic Impact of Climate Change on Ethiopian Agriculture: Ricardian Approach. *Policy Research Working Paper*; The World Bank. No. 4342.
<https://core.ac.uk/display/6616219?recSetID=>
- Eid, H. M., El-Marsafawy, S. M., & Ouda, S. A.** (2007). Assessing the Economic Impacts of Climate Change on Agriculture in Egypt. Policy Research Working Paper; No. 4293 The World Bank.
<http://hdl.handle.net/10986/7485>
- Elizalde Ángeles, E. N.** (2012). Econometría. *Red Tercer Milenio*. <https://bit.ly/3IH4Yeh>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.** (2016a). Cambio climático y seguridad alimentaria y nutricional América Latina y el Caribe (orientaciones de política). FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura).
<http://www.fao.org/3/i6311s/i6311s.pdf>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.** (2016b). *Climate change and food security: risks and responses*. Rome (Italy): Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a-i5188e.pdf>
- Fernández, F. J., & Blanco, M.** (2015). Modelling the Economic Impacts of Climate Change on Global and European Agriculture. *Review of Economic Structural Approaches. Economics*, 9(1).
<https://doi.org/10.5018/economics-ejournal.ja.2015-10>
- Galindo, L. M., Alatorre B., J. E., & Reyes M., O.** (2015a). Adaptación al cambio climático a través de la elección de cultivos en Perú. *El Trimestre Económico*, 82(327), 489.
<https://core.ac.uk/display/192806229?recSetID=>

- Galindo, L. M., Reyes, O., & Alatorre, J. E.** (2015b). Climate change, irrigation and agricultural activities in Mexico: A Ricardian analysis with panel data. *Journal of Development and Agricultural Economics*, 7(7), 261–272. <https://doi.org/10.5897/jdae2015.0650>
- Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H., & Villers, L.** (2006). Potential Impacts of Climate Change on Agriculture: A Case of Study of Coffee Production in Veracruz, Mexico. *Climatic Change*, 79(3–4), 259–288. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9066-x>
- Gebregewergs, B., & Hadush, M.** (2017). Does climate change affect price of vegetables: Evidence from Tigray, Northern most Ethiopia. *Ekonomika poljoprivrede*, 64(4), 1335–1354. <https://doi.org/10.5937/ekopolj1704335g>
- González-Santos, R., Cadena-Íñiguez, J., Morales-Flores, F. J., Ruiz-Vera, V. M., & Pimentel-López, J.** (2016). Prediction of the effects of climate change on *Sechium edule* (Jacq.) Swartz varietal groups in Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 64(4), 791–804. <https://doi.org/10.1007/s10722-016-0401-4>
- Hanemann, W. M., & Dale L.** (2006). Economic Damages from Climate Change: An Assessment of Market Impacts. Working Paper No. 1029. Department of Agricultural and Resource Economics and Policy Division ff Agriculture and Natural Resources University of California at Berkeley. <https://escholarship.org/uc/item/7vc6g48x>
- Hernández, R. C., Bonales, V., J., & Ortiz, P., C. F.** (2014). Modelos de vulnerabilidad agrícola ante los efectos del cambio climático. *Revista CIMEXUS* (2): 31-48. <https://www.cimexus.umich.mx/index.php/cim1/article/view/191>
- Hussain, A., & Bangash, R.** (2017). Impact of Climate Change on Crops' Productivity across Selected Agro-ecological Zones in Pakistan. *The Pakistan Development Review*, 56(2), 163–187. <https://doi.org/10.30541/v56i2pp.163-187>
- Husnain, M. I. U., Subramanian, A., & Haider, A.** (2018). Robustness of geography as an instrument to assess impact of climate change on agriculture. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 10(5), 654–669. <https://doi.org/10.1108/ijccsm-03-2017-0049>
- IPCC**, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2019). Resumen para responsables de políticas. En: *El cambio climático y la tierra: Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres*. IPCC. <https://bit.ly/3Nt7Y1D>
- Jain, S.** (2007). An Empirical Economic Assessment of Impacts of Climate Change on Agriculture in Zambia. *Policy Research Working Paper*; No. 4291. The World Bank. <https://core.ac.uk/reader/6372921>
- Jarvis, A., Ramirez, J., Anderson, B., Leibing, C., & Aggarwal, P.** (2010). Scenarios of climate change within the context of agriculture. En M. P. Reynolds (Ed.), *Climate change & crop production* (pp. 9–37). CAB International. <https://doi.org/10.1079/9781845936334.0000>
- Kabubo-Mariara, J., & Karanja, F. K.** (2007). The Economic Impact of Climate Change on Kenyan Crop Agriculture: A Ricardian Approach. *Policy Research Working Paper*; No. 4334. The World Bank. <https://core.ac.uk/reader/6242889>
- Kurukulasuriya, P., & Mendelsohn, R.** (2007). A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on African Cropland. *Policy Research Working Paper*; No. 4305. The World Bank. <https://core.ac.uk/reader/6645294>

- Lobell, D., & Burke, M.** (2010). Economic impacts of climate change on agriculture to 2030. En M. P. Reynolds (Ed.), *Climate change and crop production* (pp. 38–49). CAB International. <https://doi.org/10.1079/9781845936334.0000>
- López-Feldman A. J., & Hernández, C. D.** (2016). Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El Trimestre Económico*, 83(332), 459. <http://dx.doi.org/10.20430/ete.v83i332.231>
- Maddison, D., Manley, M., & Kurukulasuriya, P.** (2007). The Impact of Climate Change on African Agriculture Policy Research Working Paper No. 4306. <https://core.ac.uk/reader/6521768>
- Mano, R., & Nhemachena, C.** (2007). Assessment of the Economic Impacts of Climate Change on Agriculture in Zimbabwe: A Ricardian Approach. Policy Research Working Paper; No. 4292. The World Bank. <https://core.ac.uk/reader/6644513>
- McCarl, B. A., Thayer, A. W., & Jones, J. P. H.** (2016). The challenge of climate change adaptation for agriculture: an economically oriented review. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 48(4), 321–344. <https://doi.org/10.1017/aae.2016.27>
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D., & Shaw, D.** (1994). The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. *The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis*, 84, 753–771. <http://www.jstor.org/stable/2118029>
- Mendelsohn, R., & Dinar, A.** (1999). Climate Change, Agriculture, and Developing Countries: Does Adaptation Matter? *The World Bank Research Observer*, 14(2), 277–293. <https://doi.org/10.1093/wbro/14.2.277>
- Mendelsohn, R., Arellano-González, J., & Christensen, P.** (2009). A Ricardian analysis of Mexican farms. *Environment and Development Economics*, 15(2), 153–171. <https://doi.org/10.1017/s1355770x09990143>
- Meza-Pale, P., & Yunez-Naude, A.** (2015). The Effect of Rainfall Variation on Agricultural Households: Evidence from Mexico. En *International Conference Agricultural Economists*, International Association of Agricultural Economist (Ed.), *Agriculture in a Interconnected World*, 1–24. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.212457>
- Molua, E. L., & Lambi, C. M.** (2007). The Economic Impact of Climate Change on Agriculture in Cameroon. *Policy Research Working Paper*; No. 4364. The World Bank. <https://core.ac.uk/reader/6373651>
- Monterroso-Rivas, A. I., Conde Álvarez, A. C., Gómez Díaz, J. D., & López García, J.** (2007). Vulnerabilidad y Riesgo en Agricultura por cambio climático en la Región Centro del Estado de Veracruz, México. *Zonas Áridas*, 11(1), 47–60. <https://bit.ly/3NttTWn>
- Mourad, F., Abdelali, L., & Zouhair, L.** (2017). Modelling the impact of climate change on cereal yield in Morocco. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 2(3), 1098–1103. <https://doi.org/10.22161/ijeab/2.3.11>
- NU y CEPAL, Naciones Unidas y Comisión Económica para América Latina.** (2015). *Agricultura y cambio climático: Economía y modelación*. Naciones Unidas, Santiago de Chile. <https://bit.ly/3uxKpvX>
- Odozi, J. C.** (2015). The economic impact of climate change on small farms in Nigeria: A Ricardian approach. Department of Agricultural Economics, University of Ibadan. <https://core.ac.uk/reader/213978563>
- Onoja, A. O., & Achike, A. I.** (2014). Economic Analysis of Climate Change Effects on Arable Crop Production in Nigeria. *Journal of Economics and Sustainable Development*, 5, 76–85. <https://core.ac.uk/download/pdf/234646375.pdf>

- Ordaz**, J. L., Ramírez, D., Mora, J., Acosta, A., & Serna, B. (2010). *Costa Rica: efectos del cambio climático sobre la agricultura*. Naciones Unidas, CEPAL, México, D. F.
<https://repositorio.cepal.org/handle/11362/25921>
- Raza**, A., & Ahmad, M. (2015). Analysing the Impact of Climate Change on Cotton Productivity in Punjab and Sindh, Pakistan (N.o 9). International Development Research Centre and Institute of Development Economics. <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/72867/>
- Reilly**, J. (1999). What Does Climate Change Mean for Agriculture in Developing Countries? A Comment on Mendelsohn and Dinar. *The World Bank Research Observer*, 14(2), 295–305.
<https://doi.org/10.1093/wbro/14.2.295>
- Schlenker**, W., Hanemann, W. M., & Fisher, A. C. (2005). Will U.S. Agriculture Really Benefit from Global Warming? Accounting for Irrigation in the Hedonic Approach. *American Economic Review*, 95(1), 395–406. <https://doi.org/10.1257/0002828053828455>
- Schlenker**, W., Hanemann, W. M., & Fisher, A. C. (2006). The Impact of Global Warming on U.S. Agriculture: An Econometric Analysis of Optimal Growing Conditions. *Review of Economics and Statistics*, 88(1), 113–125. <https://doi.org/10.1162/rest.2006.88.1.113>
- Seo**, N., & Mendelsohn, R. (2007). A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on Latin American Farms. *Policy Research Working Paper* 4163, World Bank.
<https://core.ac.uk/reader/6615625>
- Seo**, N., & Mendelsohn, R. (2008). A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on South American Farms. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 68(1). <https://doi.org/10.4067/s0718-58392008000100007>
- Shayanmehr**, S., Rastegari Henneberry, S., Sabouhi Sabouni, M., & Shahnoushi Foroushani, N. (2020). Drought, Climate Change, and Dryland Wheat Yield Response: An Econometric Approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(14), 5264.
<http://dx.doi.org/10.3390/ijerph17145264>
- Stojcheska**, A. M., Hristov, J., & Surry, Y. (2019). Farm response to climate change: exploratory analysis of Macedonian agriculture using the Ricardian modeling approach. *Contributions, Section of Natural, Mathematical and Biotechnical Sciences*, 40(1), 105.
<https://doi.org/10.20903/csnmb.masa.2019.40.1.135>
- Tumwine**, G. N., Lokina, R. B., & Matovu, J. M. (2019). The Effect of Climate Change on Agricultural Crop Returns in Uganda. *Journal of Economics and Behavioral Studies*, 11(4(J)), 71–87.
[https://doi.org/10.22610/jeb.v11i4\(j\).2922](https://doi.org/10.22610/jeb.v11i4(j).2922)
- Tun Oo**, A., van Huylenbroeck, G., & Speelman, S. (2020). Measuring the Economic Impact of Climate Change on Crop Production in the Dry Zone of Myanmar: A Ricardian Approach. *Climate*, 8(1), 9. <https://doi.org/10.3390/cli8010009>
- Van Passel**, S., Massetti, E., & Mendelsohn, R. (2012). A Ricardian analysis of the Impact of Climate Change on European Agriculture (No. 83). Fondazione Eni Enrico Mattei.
<https://core.ac.uk/display/195146874?recSetID=>
- Williams**, P. A., Crespo, O., & Essegbey, G. O. (2017). Economic Implications of a Changing Climate on Smallholder Pineapple Production in Ghana. *Journal of Economics and Sustainable Development*, 8, 34–43. <https://core.ac.uk/download/pdf/234647998.pdf>
- Zaied**, Y. B., & Zouabi, O. (2015). Climate change impacts on agriculture: A panel cointegration approach and application to Tunisia. Larequad University of Tunis Elmanar, University of South Toulon. <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/64711/>