

IMPACTOS ECONÓMICOS POTENCIALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GANADERÍA: CASO DE MÉXICO

Saúl Basurto Hernández,^a Luis Miguel Galindo Paliza^a
y Julia Ríos Mohar^b

Fecha de recepción: 12 de abril de 2022. Fecha de aceptación: 12 de octubre de 2022.

<https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2023.212.69916>

Resumen. El objetivo del presente artículo es identificar los impactos del cambio climático en la ganadería en México. Se utiliza información correspondiente a 28 337 unidades de producción ganadera para estimar un modelo Ricardiano y simular los impactos del cambio climático en los ingresos netos por cabeza. Los principales resultados sugieren que el cambio climático podría reducir los ingresos netos entre -13.42 y -16.87% en 2041-2060 y entre -14.42 y -33.83% en 2081-2100. Además, los productores pequeños y con menor diversificación parecen ser los más vulnerables al cambio climático.

Palabras clave: cambio climático; ganadería; modelo Ricardiano.

Clasificación JEL: Q12; Q15; Q54.

POTENTIAL ECONOMIC IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON LIVESTOCK: THE CASE OF MEXICO

Abstract. This article aims to identify the impacts of climate change on livestock rents in Mexico. Data from 28 337 livestock production units are used to estimate a Ricardian model and to simulate the effects of climate change on net income per head. The main results suggest that climate change would likely reduce net income by between -13.42 and -16.87% in 2041-2060 and between -14.42 and -33.83% in 2081-2100. Furthermore, small and less diversified producers seem to be the most vulnerable to climate change.

Key Words: climate change; livestock; Ricardian model.

^a Universidad Nacional Autónoma de México(UNAM)-Facultad de Economía, México; ^bUNAM-Facultad de Medicina, Veterinaria y Zootecnia, México. Correos electrónicos: sbasurto@economia.unam.mx; gpaliza@unam.mx y juliariosmohar@gmail.com, respectivamente.

1. INTRODUCCIÓN

En 2020, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO, por sus siglas en inglés) reportó existencias de 1 526 y 953 millones de cabezas de ganado bovino y porcino en el mundo, respectivamente. Una producción anual de 68, 110 y 718 millones de toneladas de carne de res, carne de cerdo y leche, respectivamente (FAO, 2022). A pesar de que las tasas medias anuales de crecimiento de las existencias de ganado bovino, ganado porcino, de la producción de carne de res, carne de cerdo y de leche han sido de 0.82, 1.46, 1.53, 2.56 y 1.41% durante el periodo 1961-2020, el crecimiento esperado de la demanda de alimentos de origen animal para los siguientes años podría no alinearse con la oferta.

De acuerdo con estimaciones del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), se espera que la población global alcance los 9.74 miles de millones de personas en 2050 y 10.88 miles de millones de personas en 2100¹ (ONU, 2019). La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD, por sus siglas en inglés) reporta que el consumo per cápita de carne de res,² carne de cerdo³ y de leche fue de 6.63 kg, 11.48 kg y 9 kg⁴ durante el periodo 1990-2020 (OECD, 2021). Si este consumo per cápita se mantiene y la población mundial se incrementa en 3.08 mil millones de personas para 2100,⁵ la producción anual de carne de res, carne de cerdo y leche tendrían que aumentar 39.52%, respecto a los niveles actuales.

En México, el Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIA-CON) indica que en 2020 las existencias de ganado bovino y porcino fueron, respectivamente, de 8.41 y 20.29 millones de cabezas. Asimismo, la producción anual de carne de res, carne de cerdo y de leche ascienden a 2.08, 1.65 millones de toneladas y 12.56 miles de millones de litros (SADER, 2021). Al igual que las tendencias globales, las tasas medias de crecimiento anual de la producción de carne de res, carne de cerdo y de leche fueron de 1.69, 0.70 y 1.57% durante el periodo 1980-2020 y, para 2050 y 2100, se espera que la población en México sea de 151.15 y 141.51 millones de personas (ONU,

¹ Escenario con variante de fertilidad media.

² El consumo total de carne de res en 2020 es de 70.88 millones de toneladas (OECD, 2021).

³ El consumo total de carne de cerdo en 2020 es de 106.28 millones de toneladas (OECD, 2021).

⁴ Productos frescos derivados de la leche.

⁵ La población global en 2020 es de 7.79 miles de millones de personas (ONU, 2019).

2019). Por lo tanto, de mantenerse fijos los niveles de consumo per cápita, la oferta de carne de res, carne de cerdo y leche, ya sea con producción nacional o importaciones, tendría que aumentar 20.33 y 9.75% en 2050 y 2100 respecto a los niveles de 2020.⁶

Para cerrar la brecha entre oferta y demanda de productos ganaderos durante los próximos años será necesario incorporar más recursos naturales al proceso productivo o cambios tecnológicos, mismos que permitan producir más con menos insumos. Aunado a ello, el cambio climático impondrá un reto adicional al sector para cerrar la brecha entre oferta y demanda. A nivel mundial, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) estima que la temperatura de la superficie global aumentará entre 1.2 °C y 3.0 °C en 2041-2060 y entre 1.0 °C y 5.7 °C en 2081-2100, respecto al periodo 1850-1900 dependiendo del escenario de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que se utilice, o Shared Socioeconomic Pathway (SSP) (IPCC, 2021). En México, el Modelo Climático Global (Global Climate Models, GCM, por sus siglas en inglés) ACCESS-ESM1-5 estima que el cambio en la temperatura media será de entre 1.79 °C y 3.72 °C en 2041-2060 y entre 1.86 °C y 7.05 °C en 2081-2100 (Fick y Hijmans, 2017).⁷ El aumento de la temperatura de la superficie global puede afectar las condiciones de producción del sector pecuario por una mayor proliferación de enfermedades y plagas, alteración del ciclo hidrológico y disponibilidad de agua, disponibilidad de alimento y aumento de costos generados por estrategias de adaptación a las nuevas condiciones del clima.

De acuerdo con el GCM ACCESS-ESM1-5, en los municipios en los que se reportó algún tipo de actividad ganadera en la Encuesta Nacional Agropecuaria de 2014 (ENA 2014) (INEGI, 2014a), del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se espera que la temperatura se incremente entre 2.10 °C y 2.84 °C en 2041-2060 y entre 2.18 °C y 5.25 °C en 2081-2100 y la lluvia podría disminuir entre -0.99 mm/mes (1.32%) y -6.52 mm/mes (8.71%) para el periodo 2041-2060 y entre -1.26 mm/mes (1.68%) y -17.02 mm/mes (22.74%) para el periodo 2081-2100 dependiendo de la trayectoria de acumulación de GEI en la atmósfera (Fick y Hijmans, 2017).

Dado lo anterior, esta investigación identifica los impactos de dichos cambios en la ganadería en México. Al hacerlo, se contribuye a la literatura exis-

⁶ Se considera una población de 128.93 millones de personas en 2020 (ONU, 2019). Se estima también una disminución en la población de México a partir del año 2063 (ONU, 2019).

⁷ Se toma el promedio de las proyecciones de clima del modelo ACCESS-ESM1-5 en Fick y Hijmans (2017).

tente: *i*) con el primer estudio en México que utiliza el modelo Ricardiano, propuesto por Mendelsohn *et al.* (1994), para estimar los impactos del cambio climático en el sector ganadero; *ii*) al presentar la heterogeneidad de impactos entre diferentes tipos de productores ganaderos; y, *iii*) al utilizar una muestra de Unidades de Producción (UP) superior, en términos de observaciones, a las que existen en la literatura internacional.

El modelo Ricardiano, con el cual se identifica la asociación entre clima e ingresos netos, utiliza información de 28 337 UP ganadera que reportan su ubicación en la ENA 2014. La ubicación de las UP permite vincular Sistemas de Información Georreferenciada (Geographical Information System, GIS, por sus siglas en inglés) de clima, y de otras variables, con la información de la ENA 2014. Con ello, se pudo construir una base de datos que contiene los ingresos netos por cabeza de ganado, temperatura, lluvia, variación de temperatura, variación de lluvia y características sociodemográficas de los productores.

Los resultados indican que, en promedio, 1°C (1 mm/mes) adicional de temperatura (lluvia) se asocia con una disminución de MXN\$118.5 (MXN\$21.1) en los ingresos netos por cabeza de ganado. Al utilizar los valores esperados para los niveles de temperatura y lluvia en el periodo 2081-2100, se estima que el cambio climático puede disminuir los ingresos netos entre MXN\$289 y MXN\$678 por cabeza, es decir, entre 14.42 y 33.83% del nivel actual.

Para mayor comprensión de la investigación, la estructura del artículo quedó de la siguiente manera: después de la introducción, en la sección 2 se presenta una síntesis de la revisión de literatura sobre estudios que estiman un modelo Ricardiano para identificar los impactos del cambio climático en la ganadería a nivel internacional. La sección 3 describe la teoría, metodología e información estadística utilizada para identificar los impactos del cambio climático en la ganadería en México. En la sección 4 se presentan las estimaciones del modelo Ricardiano para diferentes muestras, las estimaciones de los cambios en la renta ganadera bajo diferentes escenarios de cambio climático y una discusión sobre las implicaciones de los resultados. En la sección 5 se muestran las conclusiones.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA. ESTUDIOS PREVIOS

En los últimos años, el modelo Ricardiano se volvió popular porque considera los procesos de adaptación de los productores a diferentes condiciones climáticas y por su capacidad de incorporar la heterogeneidad que existe entre

distintas UP. Lo anterior representa una ventaja sobre los modelos agronómicos debido a que estos no consideran la adaptación y, por consecuencia, sobrestiman los impactos del cambio climático en el sector agropecuario. Asimismo, los modelos de equilibrio general computable suelen utilizar información agregada con lo cual omiten la heterogeneidad entre productores (Mendelsohn y Dinar, 2009).

El modelo Ricardiano se utiliza para cuantificar los impactos del cambio climático en la agricultura y en la ganadería. En el sector ganadero existen estudios para África (Seo y Mendelsohn, 2007a, 2007b; Seo y Mendelsohn, 2008a, 2008b, 2008d), Sudamérica (Mendelsohn y Seo, 2007; Seo y Mendelsohn, 2008c; Seo, 2016), Kenia (Kabubo-Mariara, 2009), Mongolia (Batsuuri y Wang, 2017), Etiopía (Gebreegziabher *et al.*, 2013) y Sudáfrica (Tibesigwa *et al.*, 2017), los cuales consideran bovinos de carne, bovinos de leche, ovinos, aves y caprinos.

Para cuantificar la renta Ricardiana, o variable dependiente, los estudios previos emplean diferentes indicadores. Dentro del conjunto de estimaciones para la ganadería se encuentra que la renta de la ganadería puede aproximarse mediante ingresos netos por UP, ingresos netos por cabeza, valor de la tierra por hectárea, valor de la tierra por UP y el valor del ganado por UP. En la ganadería extensiva, o de libre pastoreo, es difícil determinar el área utilizada para alimentar a los semovientes, sobre todo en regiones con tierras ejidales o comunales, por lo que, los ingresos netos o valor de la tierra por unidad de área suelen no utilizarse. Por lo anterior, una proporción importante de artículos utiliza el valor de la variable dependiente por animal o por UP. La falta de información sobre la tenencia de la tierra y derechos de propiedad favorecen el uso de la variable ingresos netos en lugar del valor de la tierra, especialmente en países o regiones con mercados de tierra con poco dinamismo (Mendelsohn y Dinar, 2009).

En el modelo Ricardiano para la ganadería se incluye un conjunto amplio de variables de control. En la mayoría de los estudios se utiliza la altitud en la que se ubica la UP, si cuenta con electricidad, el tipo de ganado, precios de venta de los productos, tamaño del hogar del productor, porcentaje de pradera en la región, años de educación del productor, densidad de población y acceso al crédito. Con menor frecuencia, se observan variables como la distancia a los mercados de insumos y de producto, distancia al puerto más cercano, programas de capacitación y la experiencia del productor. Con respecto al nivel de agregación, en el 94.73% de los estudios la unidad de análisis es la UP, o granja, y el rango de observaciones en los modelos Ricardianos que utilizan este nivel de agregación va desde 214 hasta 15 002 granjas. Debido a la am-

plia heterogeneidad que existe entre productores ganaderos, se observa que la R-cuadrada de los modelos Ricardianos oscila entre 0.08 y 0.75, con un valor promedio de 0.2.

Al considerar aquellas estimaciones en las que se cuenta con información suficiente para obtener la proporción de los efectos marginales sobre el valor de la variable dependiente, se encuentra que el rango de dichas proporciones es muy amplio. En el caso de la temperatura, un grado centígrado adicional probablemente generaría un cambio de entre -113 y 112% de la variable dependiente,⁸ con un valor medio de 13.84% y de la mediana de 0.68%.⁹ Para la lluvia, un mm/mes adicional podría ocasionar un cambio de entre -28 y 5% de la variable dependiente y un valor promedio de -3.63% y de la mediana de -0.8% (Seo y Mendelsohn, 2008a; Gebreegziabher *et al.*, 2013; Van Passel *et al.*, 2017; Tibesigwa *et al.*, 2017; Bozzola *et al.*, 2018). De acuerdo con investigaciones previas, los efectos marginales de la temperatura y de la lluvia sobre la renta ganadera son heterogéneos y, tanto el signo como la magnitud, dependen de factores como la ubicación de la UP, el valor del clima actual y de las especies que se consideren en la estimación del modelo Ricardiano.

Bajo diferentes escenarios de cambio climático para África, Seo y Mendelsohn (2008b) estiman cambios entre -35.22 y 153.6%, Seo y Mendelsohn (2008a) entre -26.4 y 322.9%, Seo y Mendelsohn (2008d) de entre -8.08 y 168%, y Seo y Mendelsohn (2007b) de entre -72.8 y -41.7% de los ingresos netos ganaderos al final del siglo respecto a sus niveles actuales. Para América Latina, Seo y Mendelsohn (2008c) estiman cambios de entre -187 y 38% del valor de la tierra de UP ganaderas para el 2100. En Sudamérica, Seo (2016) estima una ganancia de 59.45% y Mendelsohn y Seo (2007) estiman cambios entre -19.48 y 54.81% en el valor de la tierra en 2100 como consecuencia del cambio climático. Los estudios a nivel de país indican que los ingresos netos ganaderos en Kenia podrían disminuir entre -169 y 38% (Kabubo-Mariara, 2009), en Mongolia dichos cambios oscilarían entre -80.7 y 42.4% (Batsuuri y Wang, 2017), en Etiopía entre -112 y 188% (Gebreegziabher *et al.*, 2013) y en Sudáfrica entre -133.3 y 6.1% (Tibesigwa *et al.*, 2017) en 2100, respecto a los niveles actuales. Con base en las estimaciones de estudios previos, el cambio climático tendrá efectos heterogéneos sobre los ingresos netos o valor de la tierra de UP ganadera.

⁸ En el caso de la temperatura y la lluvia, la variable dependiente puede ser el valor de la tierra por hectárea, ingresos netos por UP o ingresos netos sobre el valor total del ganado.

⁹ En el cálculo de las estadísticas se consideran efectos de estaciones y anuales.

Para la agricultura en México, existen tres estudios que utilizan el modelo Ricardiano para estimar los impactos del cambio climático. Mendelsohn *et al.* (2010) utiliza información de 621 hogares rurales donde la actividad principal es la agricultura para estimar dichos impactos y las actividades ganaderas no son la parte central del análisis. Por su parte, Galindo *et al.* (2015) utilizan un panel de datos a nivel municipal para estimar los impactos del cambio climático en el sector agrícola sin considerar a las actividades ganaderas. Basurto-Hernández (2019) estima un modelo Ricardiano para todo el sector ganadero, pero no desglosa los efectos heterogéneos por tipo de productor ni presenta estimaciones de los impactos potenciales del cambio climático sobre la producción pecuaria. De acuerdo a lo anterior, la revisión de literatura indica que no existe un estudio similar en México para la ganadería.

3. MODELO RICARDIANO E INFORMACIÓN ESTADÍSTICA

El modelo Ricardiano asume que el productor i maximiza sus ingresos netos en el periodo t considerando los precios del producto y de los insumos que rigen en el mercado en el periodo correspondiente. Con base en dicha información y el clima de largo plazo, o expectativa de clima, el productor elige la especie ganadera que genera el ingreso neto más alto. La situación anterior se puede expresar como sigue:

$$\pi_i = \text{Max}[P_j Q_{ij}(G_i, F_i, L_i, K_i, C_i, W_i, S_i) - P_F F_i - P_L L_i - P_K K_i] \quad (1)$$

donde π_i es el ingreso neto del productor i que resulta de un proceso de maximización, P_j es el precio de mercado de la especie j , Q_{ij} es la producción de la especie j del productor i , G_i es la cantidad de tierra de pastoreo, F_i es la cantidad de alimento, L_i es la cantidad de trabajo, K_i es la cantidad de capital, C_i es el clima, W_i la disponibilidad de agua, S_i la calidad del suelo, P_F es el precio del alimento, P_L es el precio del trabajo y P_K es el precio del capital.¹⁰ El productor elige la especie, el nivel de producción y las cantidades de insumos que desea utilizar para maximizar sus ingresos netos. Así, el ingreso neto resultante se puede expresar de la siguiente manera:

$$\pi_i^* = f(P_j, C_i, W_i, S_i, P_F, P_L, P_K) \quad (2)$$

¹⁰ Se asume que los precios del alimento, del trabajo y del capital no varían por especie ni entre UP, esto es, los productores son tomadores de precios de dichos insumos.

Así, la función Ricardiana se deriva del proceso de optimización descrito en la expresión (1) y captura la asociación entre la variación de los ingresos netos y la variación de las variables exógenas que influyen en el proceso de optimización, esto es, el modelo Ricardiano es la forma reducida¹¹ de la función de ingresos netos. El impacto del cambio climático se puede obtener utilizando el modelo Ricardiano definido en la expresión (2) de la siguiente manera:

$$\Delta\pi_i^* = \pi_i^*(C_i^1,) - \pi_i^*(C_i^0) \quad (3)$$

donde C_i^0 es el clima actual en la UP i , y C_i^1 es el clima futuro de la misma UP. Debido a que $P_j, W_i, S_i, P_F, P_L, P_K$ se mantienen constantes al simular el impacto de cambios en el clima en los ingresos netos y por simplicidad, se omiten en la expresión (3). Considerando lo anterior, se estima el siguiente modelo Ricardiano:

$$\begin{aligned} \pi_i = & \beta_0 + \beta_1 T_i + \beta_2 T_i^2 + \beta_3 R_i + \beta_4 R_i^2 \\ & + \beta_5 T_i R_i + \sum_{q=6}^Q \beta_q Z_i + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (4)$$

donde T_i es la normal de temperatura¹² en la UP i , R_i es la normal de lluvia,¹³ Z_i es un vector de variables exógenas distintas al clima, tales como características de la UP (altitud o distancia a mercados), del productor (experiencia, edad o sexo) o del ganado (tamaño del ható), $\beta_0 - \beta_Q$ es el conjunto de parámetros del modelo Ricardiano, Q es el número total de variables de control¹⁴ y ε_i es el término de error. Utilizando la ecuación (4), el efecto marginal de la temperatura y de la lluvia sobre el ingreso neto se puede obtener, respectivamente, de la siguiente manera:

$$E \left[\frac{\partial \pi}{\partial T} \right] = \beta_1 + 2 * \beta_2 E[T] + \beta_5 E[R] \quad (5)$$

$$E \left[\frac{\partial \pi}{\partial R_h} \right] = \beta_3 + 2 * \beta_4 E[R] + \beta_5 E[T] \quad (6)$$

¹¹ La forma reducida es una forma funcional en donde se consideran aquellos insumos que son exógenos, por lo tanto, se puede omitir al conjunto de insumos/variables endógenas (Gi, Fi, Li, Ki).

¹² La normal de temperatura representa el valor promedio de temperatura en un periodo de 30 años.

¹³ La normal de lluvia representa el valor promedio de lluvia en un periodo de 30 años.

¹⁴ La sumatoria comienza en $q=6$ para continuar con la numeración de parámetros del modelo Ricardiano en una forma abreviada.

Y, el efecto del cambio climático sobre los ingresos netos para cada UP se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$\Delta\pi_i = \beta_1(T_{1i} - T_{0i}) + \beta_2(T_{1i}^2 - T_{0i}^2) + \beta_3(R_{1i} - R_{0i}) + \beta_4(R_{1i}^2 - R_{0i}^2) + \beta_5(T_{1i}R_{1i} - T_{0i}R_{0i}) \quad (7)$$

donde el subíndice 1 indica el valor de la variable bajo diferentes escenarios de cambio climático y el subíndice 0 es el valor actual de la variable correspondiente.

Para estimar las diferentes especificaciones del modelo Ricardiano definido en la ecuación (4), se utiliza información económica y de ubicación geográfica de 28 337 UP reportada en la ENA 2014 (INEGI, 2014a).¹⁵ La variable dependiente es el ingreso neto por cabeza de ganado y resulta de calcular el cociente de la diferencia de ingresos¹⁶ y gastos¹⁷ sobre el número de cabezas de ganado bovino y porcino¹⁸ en la UP.¹⁹

La figura 1 muestra los ingresos netos medios y desviación estándar por UP y por cabeza de ganado para cada uno de los percentiles de la muestra. El 39.37% de los productores de la muestra tienen ingresos netos negativos. En general, las UP con valores negativos enfrentan el mismo clima, el tamaño de hogar es el mismo y la edad y la educación del productor son similares al resto de productores. Sin embargo, existe una mayor proporción de productores indígenas, mujeres y pequeños en las UP con ingresos netos negativos. Asimismo, existe una menor proporción de beneficiarios del Programa de Fomento Ganadero (PROGAN)²⁰ en el grupo de productores con ingresos netos negativos

¹⁵ Existen las encuestas ENA 2012, 2014, 2017 y 2019, sin embargo, la única que cuenta con información de costos de producción y de ingresos totales en toda la muestra es la ENA 2014, razón por la que se utilizó sólo esa.

¹⁶ Los ingresos totales comprenden los ingresos por venta de leche, reses y cerdos en el ciclo de producción 2013-2014. La ENA 2014 no brinda información suficiente para estimar ingresos netos de aves de corral, ovinos o caprinos.

¹⁷ Los gastos totales comprenden la cantidad gastada en alimentos balanceados, complementos alimenticios, medicamentos, vacunas, cirugías, atención médica y mejoramiento genético de los animales.

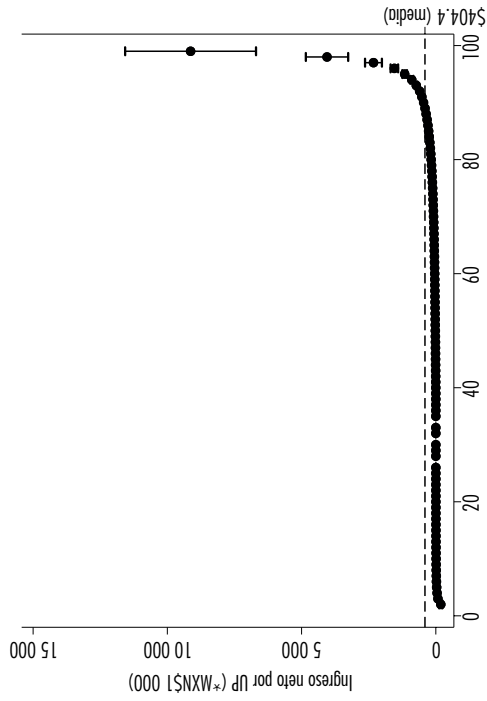
¹⁸ Es la suma de cabezas de ganado bovino (leche y carne) y porcino en cada una de las UP.

¹⁹ Los modelos Ricardianos regularmente utilizan los ingresos netos por hectárea, o unidad de tierra, sin embargo, en la ganadería no es posible identificar el área de producción de ganado, especialmente en países donde existen tierras de uso común (o ejidos como en el caso de México) donde se realizan prácticas de libre pastoreo. Por lo tanto, la literatura existente sugiere considerar el ingreso neto por cabeza de ganado.

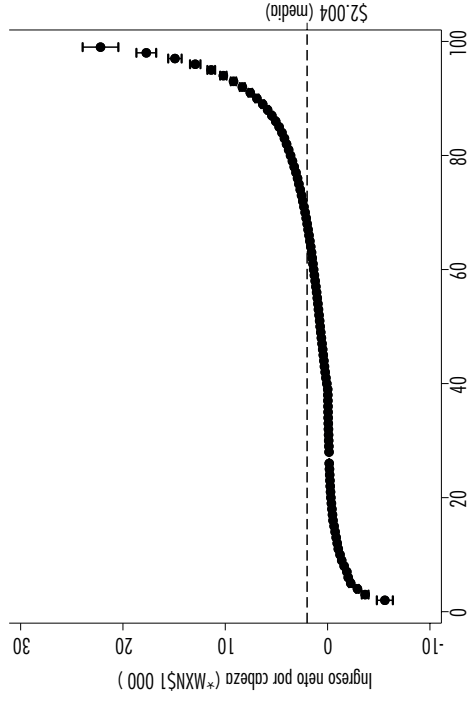
²⁰ El PROGAN tiene el objetivo de contribuir en el aumento de la productividad de las UP a través de la inversión en el sector pecuario. Los apoyos son otorgados a ejidatarios, colonos, comuneros,

Figura 1. Ingresos netos medios y desviación estándar por percentil

1a) Ingresos netos por UP



1b) Ingresos netos por cabeza



Nota: los puntos representan la media de ingresos netos del percentil correspondiente, mientras que la línea hacia arriba y debajo de cada punto representa la desviación estándar.
Fuente: elaboración propia con datos de la Encuesta Nacional Agropecuaria (INEGI, 2014a).

(8.22% del total de este grupo) en comparación con los que tienen ingresos netos positivos (26.47% del total de este grupo).

De acuerdo con la revisión de literatura descrita anteriormente, el conjunto de variables de control en el modelo Ricardiano comprende las normales de temperatura y lluvia, variación en el clima, características sociodemográficas de los productores y otras variables exógenas que determinan los ingresos netos en el sector ganadero.

Para obtener las normales de temperatura y lluvia, la desviación estándar de la temperatura, del coeficiente de variación de la lluvia y la temperatura diurna, se usaron las bases de datos ráster (matriz de celdas o píxeles) publicados por Fick y Hijmans (2017), WorldClim versión 2.1, los cuales contienen los valores medios mensuales de las variables anteriores para el periodo 1970-2000 y cuentan con una resolución espacial de 30 segundos, aproximadamente de 1 km². Debido a que la ENA 2014 reporta la ubicación geográfica de las UP a nivel municipal, se empleó el Marco Geoestadístico Municipal 2014, la herramienta *Zonal statistics as table* de ArcGis y las bases de datos ráster correspondientes para obtener los valores mensuales de clima en cada uno de los 2 465 municipios de México. Con ello, se asigna el clima a cada una de las UP que cuentan con información en la ENA 2014 (véase figura 2 para las normales de clima).

Utilizando el ráster de elevación de WorldClim 2.1, se calcula el promedio de altitud municipal. Para calcular la densidad carretera, se utiliza la Red Nacional de Caminos (INEGI, 2014b), el Marco Geoestadístico Municipal 2014 y herramientas de ArcGis para obtener el cociente entre el total de la longitud de caminos dentro de un municipio sobre su área total. Las variables de control restantes se toman de la ENA 2014.

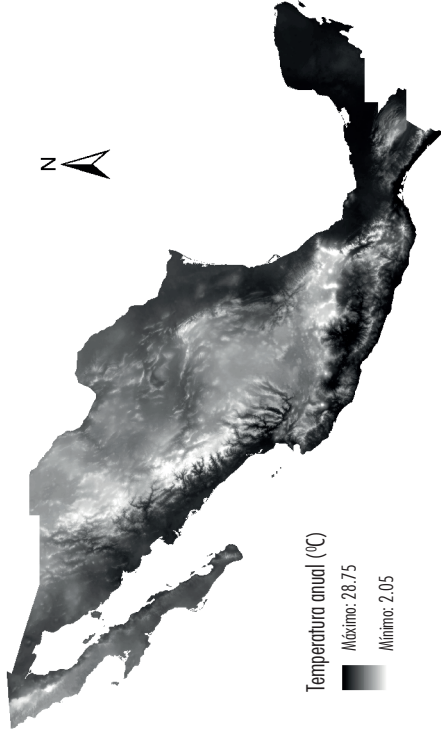
La tabla 1 muestra las estadísticas descriptivas de la muestra de UP que se utiliza en la estimación del modelo Ricardiano. En promedio, los ingresos netos por cabeza de ganado son de MXN\$2 004.²¹ La temperatura anual oscila entre 10.37 °C y 27.96 °C y la lluvia anual entre 6.55 mm/mes y 337.30 mm/mes. La variación en las normales de clima es un requisito fundamental para

pequeños propietarios, y sociedades civiles o mercantiles establecidas conforme a la legislación mexicana, propietarios o con derecho de uso de tierras de pastoreo dedicadas a la cría de ganado en forma extensiva, mediante el uso de su vegetación nativa o de praderas, que se inscriban en el Padrón Ganadero Nacional (PGN). En 2014, los beneficiados del programa recibieron MXN\$1 800 por vientre bovino en edad reproductiva distribuidos de la siguiente manera: MXN\$300 el primer año, MXN\$400 el segundo, MXN\$500 el tercero y MXN\$600 en el cuarto año. En el caso de cerdos, el monto fue de MXN\$117 por vientre.

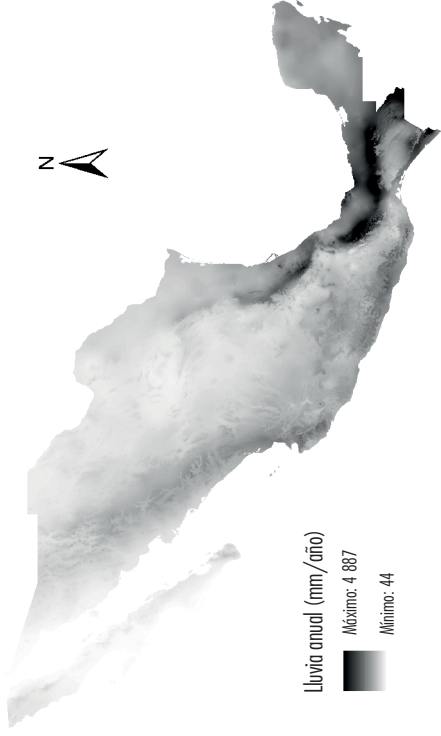
²¹ USD\$151.56 con un tipo de cambio promedio en 2014 de MXN\$13.31 (BM, 2022).

Figura 2. Bases de datos GIS sobre clima

Temperatura 1970-2000 (°C)



Lluvia 1970-2000 (mm/año)



Fuente: elaboración propia con datos de WorldClim2.0 (Fick y Hijmans, 2017).

la estimación del modelo Ricardiano con datos de sección cruzada, por lo que los rangos de temperatura y lluvia en la muestra indican que se cuenta con variación suficiente en el clima para estimar el modelo Ricardiano. La desviación estándar promedio del periodo 1970-2000 en los municipios en donde hay actividades ganaderas oscila entre 0.63 y 8.00 °C y el coeficiente de variación de la lluvia para el mismo periodo oscila entre 63 y 133. La temperatura diurna captura la diferencia entre el valor máximo durante el día y el mínimo durante la noche de la temperatura y en la muestra de UP de este trabajo, dicho valor oscila entre 8.15 y 20.28 °C. Así como en el clima de largo plazo, se observa una gran variación en la altitud promedio en la que se localizan las UP de la muestra, desde 1.65 hasta 3 225 metros sobre el nivel del mar (masl). La densidad carretera muestra que, en promedio, en zonas de producción ganadera existen 302 metros lineales de caminos por cada km² de área.

Además de las variables climáticas y las características propias de su ubicación (altitud y densidad carretera), el modelo Ricardiano incluye un conjunto de características sociodemográficas del productor (tamaño del hogar, edad, sexo, educación, etnicidad y subsidios). En la muestra, la edad promedio de los productores es de 58 años, el 90.7% de las UP es encabezada por hombres, la educación media de los productores es de 3.35 años (educación primaria incompleta) y el 18.7% se reconoce a sí mismo como indígena. Las UP de la muestra tienen, en promedio, 106 cabezas de ganado y un valor de la mediana de 20 cabezas. Adicionalmente, se incluye una variable dicotómica para indicar si el productor es beneficiario del programa de subsidios a la ganadería PROGAN, en la muestra, el 19.2% de los productores recibe dichas transferencias.

Tabla 1. Estadísticas descriptivas de la muestra

<i>Variable</i>	<i>Obs.</i>	<i>Media</i>	<i>SD</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>
Ingreso neto por UP (\$*1 000/UP)	28 337	404.4	5.676	-111 766	650 000
Ingreso neto por cabeza (\$*1 000/cabeza)	28 337	2.004	4.509	-10.98	30.67
Temperatura anual (°C)	28 337	20.21	4.363	10.37	27.96
Lluvia anual (mm/mes)	28 337	74.83	42.26	6.554	337.3
Desviación estándar de la temperatura (*100)	28 337	293.6	141.5	62.74	799.5
Coefficiente de variación de la lluvia	28 337	92.09	19.93	42.25	132.7

Continúa

Tabla 1. Estadísticas descriptivas de la muestra (continuación)

<i>Variable</i>	<i>Obs.</i>	<i>Media</i>	<i>SD</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>
Temperatura diurna (°C)	28 337	15.00	2.444	8.152	20.28
Altitud (masl)	28 337	1.237	898.1	1.649	3 225
Densidad carretera (km/km ²)	28 337	0.302	0.258	0.00765	2.116
Tamaño del hogar (integrantes)	28 337	3.736	2.059	1.00	32.00
Edad del productor (años)	28 337	58.36	13.79	18.00	100.00
Sexo del productor (1=hombre)	28 337	0.907	0.290	0.00	1.00
Educación (años)	28 337	3.349	2.002	0.00	8.00
Indígena (1=se reconoce como indígena)	28 337	0.187	0.390	0.00	1.00
PROGAN (1=el productor es beneficiario)	28 337	0.193	0.395	0.00	1.00
Cabezas de bovinos y porcinos (cabezas)	28 337	106.4	838.3	1.00	50 000
Cabezas de bovinos (cabezas)	28 337	65.82	422.7	0.00	50 000
Cabezas de porcinos (cabezas)	28 337	40.56	710.7	0.00	44 000

Nota: Obs: número de observaciones; Media: promedio de la variable en la muestra; SD: desviación estándar; Mín: valor mínimo en la muestra; y, Máx: valor máximo en la muestra.

Fuente: elaboración propia con datos de la Encuesta Nacional Agropecuaria (INEGI, 2014a).

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de la estimación del modelo Ricardiano definido en la ecuación (4), los efectos de cambios marginales y no marginales de la temperatura y la lluvia sobre los ingresos netos por cabeza de ganado definidos en las ecuaciones (5), (6) y (7). Para identificar la mejor forma funcional del modelo Ricardiano se realizaron las siguientes pruebas. Primero, la distribución de la variable dependiente muestra valores negativos, lo cual descarta la posibilidad de utilizar la forma funcional semilogarítmica.²² Para solucionar este problema, la literatura sugiere desplazar la distribución de la variable dependiente hacia la derecha al añadir un valor constante, valor mínimo más uno, a cada observación. Sin embargo, dicha transformación ha sido ampliamente criticada por influir en los resultados de las estimaciones

²² Transformación logarítmica de los ingresos netos por cabeza.

que utilizan una forma funcional semilogarítmica. Por lo tanto, en este estudio se utilizó la variable dependiente sin ninguna transformación, *i.e.* ingresos netos por cabeza expresados en miles de pesos.

En segundo lugar, se evaluó la pertinencia de incluir subconjuntos de variables de control en el modelo Ricardiano. Los resultados de la prueba F^{23} indican que, en conjunto, las variables de clima, ($F(5, 28314)=44.47$, $\text{Prob}>F=0.00$), las variables de clima extremo, ($F(3, 28314)=107.28$, $\text{Prob}>F=0.00$), atributos de la UP y características sociodemográficas de los productores ($F(10, 28314)=85.42$, $\text{Prob}>F=0.00$) y efectos fijos por región ($F(4, 28314)=36.20$, $\text{Prob}>F=0.00$) son estadísticamente significativas, por lo tanto, deben incluirse en el modelo Ricardiano. Asimismo, la prueba F sugiere que los términos cuadrados de las variables climáticas ($F(2, 28314)=36.99$, $\text{Prob}>F=0.00$) y las interacciones de clima ($F(1, 28314)=38.15$, $\text{Prob}>F=0.00$) son, en conjunto, estadísticamente significativas. Lo anterior confirma una relación no lineal entre el clima y los ingresos netos de los productores y que los efectos marginales de temperatura y lluvia dependen del clima actual en cada una de las UP.

La tabla 2 presenta el conjunto de parámetros estimados del modelo Ricardiano para todos los productores, productores de bovinos, productores de porcinos, productores de bovinos y porcinos, grandes y pequeños productores.²⁴ Las estimaciones para diferentes grupos de productores permiten identificar la heterogeneidad de los efectos del cambio climático sobre la ganadería en México. En el caso de la temperatura, los coeficientes asociados al término cuadrado de los diferentes tipos de UP no son estadísticamente significativos, excepto en el caso de bovinos, donde se encuentra una asociación de U invertida con los ingresos netos. Para el caso de la lluvia, se observa una relación tipo U con respecto a los ingresos netos, excepto en la producción de porcinos. Asimismo, se encuentra que los coeficientes asociados al término de interacción entre temperatura y lluvia son, en su mayoría, estadísticamente significativos, esto sugiere que el efecto marginal de una variable climática depende del nivel actual de la otra variable, *i.e.* el efecto de un grado adicional de calentamiento de la tierra no afecta de la misma forma a una UP con 30 mm/mes que a una UP con 120 mm/mes de lluvia y viceversa.

²³ La hipótesis nula de la prueba F indica que los parámetros estimados para el conjunto de variables de control correspondientes no son estadísticamente significativos con un nivel de significancia del 5%.

²⁴ Para diferenciar entre grandes y pequeños productores se tomó la mediana de la distribución del número de cabezas de ganado que tienen las UP en la muestra. Los pequeños productores tienen de 1 a 20 cabezas y los grandes productores tienen más de 20 cabezas de ganado.

Tabla 2. Parámetros estimados del modelo Ricardiano

<i>Variable</i>	<i>Todas</i>	<i>Bovinos</i>	<i>Porcinos</i>	<i>Bovinos y porcinos</i>	<i>Pequeños</i>	<i>Grandes</i>
Temperatura	-0.1055 (0.0736)	0.0628 (0.0962)	0.0725 (0.0823)	-0.4045** (0.1687)	-0.0144 (0.0860)	-0.2089* (0.1234)
Temperatura^2	-0.0039 (0.0024)	-0.0104*** (0.0031)	-0.0027 (0.0027)	0.0083 (0.0056)	-0.0030 (0.0029)	-0.0030 (0.0038)
Lluvia	-0.0716*** (0.0064)	-0.0811*** (0.0087)	0.0145** (0.0063)	-0.0510*** (0.0134)	-0.0194*** (0.0072)	-0.1091*** (0.0112)
Lluvia^2	0.000076*** (0.000011)	0.000059*** (0.000013)	-0.000007 (0.000015)	0.000065*** (0.000023)	0.000026* (0.000015)	0.000095*** (0.000015)
Temperatura*Lluvia	0.0019*** (0.0003)	0.0024*** (0.0004)	-0.0004 (0.0003)	0.0012* (0.0007)	0.0004 (0.0004)	0.0029*** (0.0005)
SD de la temperatura*100	0.0029*** (0.0005)	0.0015** (0.0006)	-0.0017** (0.0008)	0.0063*** (0.0012)	0.0012* (0.0007)	0.0018*** (0.0007)
Coef. Var. de la lluvia	0.0270*** (0.0017)	0.0235*** (0.0021)	0.0059** (0.0026)	0.0289*** (0.0034)	0.0100*** (0.0023)	0.0177*** (0.0024)
Diurna	0.0768*** (0.0242)	0.1404*** (0.0315)	0.0148 (0.0268)	-0.1128** (0.0496)	0.0246 (0.0281)	0.0503 (0.0378)
Altitud	-0.0009*** (0.0002)	-0.0011*** (0.0002)	-0.0003 (0.0003)	0.0001 (0.0004)	-0.0005* (0.0002)	-0.0006* (0.0003)
Densidad carretera	2.4610*** (0.1710)	3.1876*** (0.2242)	0.0242 (0.1802)	1.5097*** (0.3578)	0.8819*** (0.1794)	4.9162*** (0.2855)
Tamaño del hogar	0.0190 (0.0140)	0.0611*** (0.0187)	-0.0010 (0.0146)	0.1025*** (0.0279)	0.0305* (0.0160)	0.0367* (0.0217)
Edad	-0.0090*** (0.0020)	-0.0143*** (0.0025)	-0.0025 (0.0025)	-0.0066 (0.0044)	-0.0091*** (0.0025)	-0.0123*** (0.0030)
Hombre	0.8377*** (0.0739)	0.7690*** (0.0983)	0.2579*** (0.0875)	0.3943** (0.1577)	0.3871*** (0.0823)	0.6067*** (0.1214)
Educación	0.0989*** (0.0131)	0.1056*** (0.0165)	-0.0046 (0.0176)	0.0805*** (0.0281)	0.0188 (0.0157)	0.0890*** (0.0196)
Indígena	-0.7972*** (0.0621)	-0.7796*** (0.0830)	0.1085 (0.0754)	-0.5145*** (0.1282)	-0.1621** (0.0737)	-0.5210*** (0.0966)
PROGAN	0.6654*** (0.0547)	0.2996*** (0.0648)	0.3437 (0.2480)	0.8110*** (0.1193)	0.1392 (0.1100)	0.0663 (0.0675)

Variable	Todas	Bovinos	Porcinos	Bovinos y porcinos	Pequeños	Grandes
Cabezas	0.0006*** (0.0001)	0.0026*** (0.0003)	0.0003*** (0.0001)	0.0001 (0.0001)	0.6804*** (0.0205)	0.0002** (0.0001)
Cabezas^2	-0.00000002*** (0.000000005)	-0.00000005*** (0.00000001)	-0.00000001*** (0.000000002)	-0.000000002 (0.00000000)	-0.0228*** (0.0010)	-0.00000001 (0.000000004)
Región centro	-0.6386*** (0.1276)	-0.6924*** (0.1737)	-0.1226 (0.1397)	-0.4054 (0.2563)	0.1325 (0.1466)	-0.5399** (0.2313)
Región centro occidente	-0.7760*** (0.0933)	-0.8849*** (0.1153)	0.3575** (0.1673)	-0.8738*** (0.2215)	-0.6299*** (0.1330)	-1.1422*** (0.1322)
Región noreste	-1.5660*** (0.1306)	-1.9132*** (0.1598)	0.5394** (0.2567)	-1.4207*** (0.2725)	-1.0950*** (0.1859)	-2.0584*** (0.1798)
Región noroeste	-1.5480*** (0.1784)	-1.8099*** (0.2097)	1.1221 (0.7117)	-1.7838*** (0.4162)	-0.3486 (0.2893)	-1.9721*** (0.2308)
Región sureste (omitida)	-	-	-	-	-	-
Constante	3.4558*** (1.0273)	3.4305*** (1.3108)	-1.2954 (1.1878)	4.2837* (2.1946)	-1.1165 (1.3000)	8.4748*** (1.5975)
Observaciones	28 337	20 747	3 530	4 060	14 464	13 873
R-cuadrada	0.065	0.089	0.039	0.063	0.143	0.115

Nota: la variable dependiente es ingresos netos por cabeza expresada en miles de pesos. Las estimaciones incluyen efectos fijos por región. Errores estándar robustos entre paréntesis. *** p<0.01; ** p<0.05; * p<0.1.

Fuente: elaboración propia con datos de la Encuesta Nacional Agropecuaria (INEGI, 2014a).

Contrario a las expectativas iniciales, una mayor variación climática de largo plazo suele asociarse con mayores ingresos netos. Para el caso de la desviación estándar de la temperatura, cuando dicha variación es mayor los ingresos netos son más altos, excepto en el caso de los productores especializados en porcinos en donde el estrés por temperatura podría generar mayor susceptibilidad a enfermedades. En el caso del coeficiente de variación de la lluvia y de la temperatura diurna se observa la misma relación en la mayoría de las muestras. Debido a que se asume que los productores están adaptados a las condiciones de clima actual del lugar en el que se ubican, este resultado se puede presentar debido a condiciones de mercado. De esta manera, se argumentó que en los lugares en donde hay mayor variación de clima los precios de los productos son más altos, por ende, el ingreso neto podría ser mayor.

Los coeficientes asociados a la altitud son, en general, negativos y estadísticamente significativos, lo que sugiere que aquellas UP ubicadas en lugares con mucha altitud suelen obtener menores ingresos netos por cabeza de ganado. Tomando la muestra de todas las UP, 100 masl adicionales se asocian con un ingreso neto MXN\$90 inferior. En el caso de los porcinos, dicha asociación no es estadísticamente significativa. Un aumento en la densidad carretera se asocia con niveles de ingresos netos superiores. La densidad carretera se incluye en el modelo Ricardiano con el propósito de capturar la conectividad con los mercados que tienen las UP. Los resultados muestran que la inversión en vías de comunicación terrestre puede tener un impacto importante en los ingresos netos de los ganaderos. Lo anterior, se debe a que estar mejor conectado con el mercado permite la adquisición de insumos de mejor calidad a menor costo al evitar costos de transporte y venta de productos con mayor rapidez respecto a UP ubicadas en zonas remotas.

Estudios previos utilizan el tamaño del hogar para controlar por costos de trabajo familiar, que regularmente no se reportan en las encuestas disponibles. Los resultados indican que el tamaño del hogar muestra una relación positiva y estadísticamente significativa con los ingresos netos, lo cual coincide con Kabubo-Mariara (2009). Consistente con las expectativas iniciales, la edad del productor se asocia de manera inversa con el monto de ingresos netos, *i.e.* los productores más jóvenes suelen obtener ingresos netos más altos; los hombres obtienen ingresos netos más altos que las mujeres; un año adicional de educación se asocia con niveles de ingresos netos superiores, *i.e.* el retorno de un año adicional de educación es, en promedio, de MXN\$99 por cabeza de ganado; por otro lado, las o los productores que se identifican como indígenas tienen ingresos netos por cabeza MXN\$797 inferiores al resto de ganaderos. De lo anterior, se puede inferir que los productores mayores, mujeres, con poca educación y miembros de alguna comunidad indígena son más vulnerables al cambio climático.

Existe una relación de U invertida entre el número de cabezas de ganado y los ingresos netos por cabeza. Lo anterior implica que existe un punto de inflexión donde la contribución marginal de un animal adicional sobre los ingresos netos se vuelve negativa. El coeficiente asociado al indicador del subsidio PROGAN sugiere que en promedio sus beneficiarios tienen ingresos netos superiores a los productores que no reciben dichas transferencias. Esto podría indicar regresividad del programa, *i.e.* las transferencias se dirigen a productores con ganancias mayores. Por último, el modelo Ricardiano incluye variables dicotómicas que indican la región en la que se encuentra la UP con el objetivo de capturar diferencias estructurales entre una región y otra que determinan el nivel de ingresos netos por cabeza en la muestra.

Utilizando los parámetros estimados de la tabla 2 y los valores medios de temperatura y lluvia para cada una de las muestras, la tabla 3 presenta los efectos marginales de las variables climáticas sobre los ingresos netos por cabeza de ganado en las muestras correspondientes. En promedio, se espera que un grado adicional de temperatura disminuya los ingresos netos por cabeza en -MXN\$118.5 (5.89% del valor actual). Dicho efecto oscila entre -MXN\$98.9 y -MXN\$180.7 por cabeza dependiendo del tipo de productor. En el caso de productores especializados en porcinos y productores no especializados (porcinos y bovinos), el efecto marginal evaluado en los valores medios no es estadísticamente significativo. El ganado porcino en México, generalmente, se encuentra estabulado por lo que los productores pueden lidiar con un aumento de temperatura con mayor facilidad, que aquellos que producen bovinos de libre pastoreo.

Evaluando la ecuación (6) en los valores medios, un mm/mes adicional representaría una disminución de los ingresos netos por cabeza de -MXN\$21.1 pesos si se consideran todas las UP de la muestra. Este valor se encuentra entre -MXN\$34.6 y MXN\$4.6, donde los únicos que resultan beneficiados con el cambio marginal en la lluvia son los productores especializados en la producción de porcinos.

Fick y Hijmans (2017) utilizan un conjunto de GCM para construir bases de datos ráster con estimaciones del clima futuro a nivel global para los periodos 2041-2060 y 2081-2100. Utilizando el promedio municipal de los valores que genera el GCM ACCESS-ESM1-5²⁵ y los coeficientes de la tabla 2, se reemplaza el clima actual con el clima futuro y se calcula el cambio en los ingresos netos por cabeza en cada una de las UP de la muestra. La tabla 4 muestra los valores promedio de la temperatura, lluvia e ingresos netos por cabeza actuales y futuros para los periodos 2041-2060 y 2081-2100 bajo los escenarios SSP126 y SSP585²⁶ (véase IPCC, 2022 para la descripción completa

²⁵ En estudios Ricardianos existentes se ha utilizado una amplia variedad de simulaciones sobre el clima futuro. En este artículo se utilizan las simulaciones de clima futuro del GCM ACCESS-ESM1-5 debido a que ofrece un rango amplio de escenarios posibles de cambio climático en México, *i.e.* se pueden evaluar impactos de cambios menores y drásticos en el clima sobre los ingresos netos de los productores.

²⁶ Por motivos de presentación, se seleccionaron los SSP 126 y 585 que capturan las trayectorias extremas de emisiones de gases de efecto invernadero y, por ende, los extremos en los cambios de temperatura y lluvia. Por lo tanto, el rango de estimaciones presentadas en este trabajo de investigación engloba los resultados que se obtienen al utilizar escenarios intermedios: SSP 245 y 370. A pesar de que existen proyecciones de clima para los periodos 2021-2040 y 2061-2080, se presentan resultados únicamente para los periodos 2041-2060 y 2081-2100 para mostrar las estimaciones a mitad y final del siglo y mejorar la presentación de resultados.

Tabla 3. Efectos marginales de la temperatura y lluvia

<i>Variable</i>	<i>Todas</i>	<i>Bovinos</i>	<i>Porcinos</i>	<i>Bovinos y porcinos</i>	<i>Pequeños</i>	<i>Grandes</i>
Temperatura (°C)	-0.1185*** (0.0372)	-0.1807*** (0.0459)	-0.0713 (0.0454)	0.0035 (0.0730)	-0.0989** (0.0459)	-0.1200** (0.0546)
Lluvia (mm/mes)	-0.0211*** (0.0015)	-0.0223*** (0.0018)	0.0046** (0.0021)	-0.0187*** (0.0034)	-0.0071*** (0.0020)	-0.0346*** (0.0022)
Observaciones	28 337	20 747	3 530	4 060	14 464	13 873

Nota: Errores estándar entre paréntesis; *** $p < 0.01$; ** $p < 0.05$; * $p < 0.1$.

Fuente: elaboración propia con datos de la Encuesta Nacional Agropecuaria (INEGI, 2014a).

de los escenarios ssp126 y ssp585). Se utilizaron los parámetros estimados y valores correspondientes para cada una de las muestras para las que se estiman los modelos Ricardianos de la tabla 2 y entre corchetes se muestran los valores mínimos y máximos de cada una de las distribuciones de las variables.

Al considerar la muestra de todas las UP que contiene la ENA 2014, se puede observar que la temperatura de las zonas en donde se ubican podría incrementarse entre 2.10 °C y 2.84 °C en 2041-2060 y entre 2.18 °C y 5.25 °C en 2081-2100 dependiendo de las trayectorias de acumulación de GEI en la atmósfera. Además de ello, la lluvia podría disminuir entre -0.99 mm/mes (1.32%) y -6.52 mm/mes (8.71%) para el periodo 2041-2060 y entre -1.26 mm/mes (1.68%) y -17.02 mm/mes (22.74%) para el periodo 2081-2100. Así, el GCM ACCESS-ESM1-5 estima, en promedio, un futuro más seco y caluroso para las zonas en donde se produce ganado bovino y porcino en México. Al sustituir el clima actual con el clima futuro en cada una de las UP, como lo indica la ecuación (7), los resultados sugieren que el ingreso neto por cabeza podría disminuir entre -13.42 y -16.87% para el periodo 2041-2060 y entre -14.42 y -33.83% respecto a su nivel actual.

La combinación de aumento de temperatura y disminución de lluvia generará pérdidas importantes a los productores especializados en la producción de porcinos. Bajo el conjunto de escenarios de cambio climático, las pérdidas de estos productores podrían ascender hasta el 134% del ingreso neto por cabeza promedio actual, si se considera el escenario ssp585 para el periodo 2081-2100. Por otro lado, los productores que no se especializan en una sola especie, podrían beneficiarse de dichos cambios en el clima. Los resultados de la tabla 4 muestran que los ingresos netos por cabeza de UP mixtas podrían incremen-

tarse entre 2.81 y 7.72% para el periodo 2041-2060 e, incluso, incrementarse entre 2.81 y 22.96% para el periodo 2081-2100. Este resultado es consistente con diversos estudios que argumentan que la diversificación de la producción reduce considerablemente la vulnerabilidad al cambio climático (Mendelsohn y Dinar, 2009).

Si se toma en cuenta el tamaño de la *UP*, la tabla 4 muestra que los pequeños productores son más vulnerables al cambio climático que los grandes ganaderos. Para el periodo 2041-2060, el primer grupo podría enfrentar pérdidas entre -20.7 y -26.9% de sus ingresos netos por cabeza actuales, mientras que para el segundo grupo dichas disminuciones oscilarían entre -9.0 y -10.2%. Asimismo, para 2081-2100 los pequeños productores podrían enfrentar pérdidas de hasta -52% y los grandes productores de hasta -20%.

Los resultados coinciden con las estimaciones de Mendelsohn *et al.* (2010) y Galindo *et al.* (2015) respecto a la magnitud de las pérdidas que puede originar el cambio climático a los productores del sector primario. Mendelsohn *et al.* (2010) estiman que para el 2100, el valor de la tierra agrícola por hectárea puede disminuir entre -42 y -54% respecto al valor actual como consecuencia del cambio climático. Por su parte, Galindo *et al.* (2015) estiman que para el 2100 los productores enfrentarán pérdidas de entre -18.6 y -36.4% de sus ingresos netos por hectárea respecto a los niveles actuales. Al analizar al sector ganadero, se encontró que el cambio en los ingresos netos por cabeza de ganado para el 2100 puede ir desde -14.4% hasta -33.8%. Sin duda, cambios en el clima podrían generar una pérdida de ingresos importantes para las personas que dependen del sector primario en México y además una reducción considerable en la oferta de alimentos. Por lo que, es crucial que las políticas económicas que se instrumenten en los próximos años se enfoquen en reducir la vulnerabilidad del sector.

De esta investigación se pueden derivar las siguientes recomendaciones de política económica: primero, dado que los productores de mayor edad, mujeres, indígenas, con menor educación y pequeños son más vulnerables a cambios en las condiciones climáticas, los encargados de la política económica deberían centrar sus esfuerzos en reducir las brechas que existen entre estos grupos y sus contrapartes. Segundo, para reducir la vulnerabilidad al cambio climático se debe promover la diversificación de especies dentro de la *UP*. Para ello, la política económica debe apoyar a los productores con inversiones en infraestructura que permita dicha diversificación, especialmente a pequeños productores quienes suelen no contar con ahorros o fuentes de crédito suficientes para hacer este tipo de inversiones, por ejemplo, nuevos corrales, comederos, áreas de pastoreo, bodegas, entre otras.

Tabla 4. Impactos del cambio climático en los ingresos netos de los ganaderos en México

Variable	ACCESS-ESM1-5				
	1970-2000	2041-2060	2081-2100		
	Actual	SSP126	SSP585	SSP126	
Todas las UP					
Temperatura (°C)	20.21 [10.37-27.96]	22.31 [12.54-30.50]	23.05 [13.22-31.41]	22.39 [12.62-30.81]	25.46 [15.53-34.43]
Lluvia (mm/mo)	74.83 [6.55-337.30]	73.84 [6.86-332.40]	68.31 [6.80-302.10]	73.57 [6.85-325.70]	57.81 [7.22-255.40]
Ingreso neto/cabeza (\$*1 000)	2.004 [-10.98-30.67]	1.735 [-11.25-30.42]	1.666 [-11.32-30.44]	1.715 [-11.25-30.41]	1.326 [-11.68-30.28]
Ingreso neto/cabeza (%)		-13.42	-16.87	-14.42	-33.83
Bovinos					
Temperatura (°C)	20.45 [10.48-27.96]	22.55 [12.65-30.50]	23.30 [13.33-31.41]	22.63 [12.73-30.81]	25.70 [15.65-34.43]
Lluvia (mm/mo)	74.35 [6.55-337.30]	73.47 [6.86-332.40]	68.01 [6.80-302.10]	73.24 [6.85-325.70]	57.72 [7.22-255.40]
Ingreso neto/cabeza (\$*1 000)	2.490 [-10.98-30.67]	2.060 [-11.52-30.43]	1.915 [-11.73-30.47]	2.031 [-11.54-30.41]	1.262 [-12.53-30.26]
Ingreso neto/cabeza (%)		-17.27	-23.09	-18.43	-49.32
Porcinos					
Temperatura (°C)	19.63 [10.37-27.89]	21.73 [12.54-30.00]	22.47 [13.22-30.78]	21.81 [12.62-30.26]	24.86 [15.53-33.31]
Lluvia (mm/mo)	81.97 [9.24-333.90]	80.35 [9.68-317.50]	73.93 [9.55-291.30]	79.80 [9.68-311.70]	61.67 [9.98-239.50]
Ingreso neto/cabeza (\$*1 000)	-0.353 [-10.70-28.33]	-0.517 [-10.83-28.19]	-0.593 [-10.90-28.13]	-0.525 [-10.83-28.20]	-0.826 [-11.11-27.91]
Ingreso neto/cabeza (%)		-46.46	-67.99	-48.73	-133.99

Bovinos y porcinos						
Temperatura (°C)	19.49 [10.48-27.51]	21.58 [12.65-30.03]	22.33 [13.33-30.98]	21.65 [12.73-30.34]	24.75 [15.65-34.03]	
Lluvia (mm/mo)	71.07 [9.24-333.90]	70.08 [9.68-317.50]	64.97 [9.55-291.30]	69.87 [9.68-311.70]	54.89 [9.98-239.50]	
Ingreso neto/cabeza (\$*1 000)	1.568 [-1.080-29.91]	1.612 [-1.11-29.82]	1.689 [-1.13-29.89]	1.612 [-1.14-29.81]	1.928 [-1.21-30.08]	
Ingreso neto/cabeza (%)	2.81	2.81	7.72	2.81	22.96	
Pequeños productores						
Temperatura (°C)	19.60 [10.37-27.96]	21.71 [12.54-30.50]	22.45 [13.22-31.41]	21.79 [12.62-30.81]	24.86 [15.53-34.43]	
Lluvia (mm/mo)	76.09 [6.55-333.90]	74.93 [6.86-317.50]	69.31 [6.80-291.30]	74.63 [6.85-311.70]	58.39 [7.22-239.50]	
Ingreso neto/cabeza (\$*1 000)	1.059 [-1.098-30.67]	0.840 [-1.24-30.49]	0.774 [-1.30-30.47]	0.828 [-1.24-30.48]	0.508 [-1.58-30.32]	
Ingreso neto/cabeza (%)	-20.68	-20.68	-26.91	-21.81	-52.03	
Grandes productores						
Temperatura (°C)	20.85 [10.48-27.96]	22.94 [12.64-30.50]	23.69 [13.29-31.41]	23.02 [12.71-30.81]	26.09 [15.57-34.43]	
Lluvia (mm/mo)	73.52 [9.24-337.30]	72.70 [9.68-332.40]	67.27 [9.55-302.10]	72.47 [9.68-325.70]	57.20 [9.98-255.40]	
Ingreso neto/cabeza (\$*1 000)	2.989 [-1.089-30.52]	2.719 [-1.34-30.21]	2.685 [-1.39-30.24]	2.697 [-1.40-30.17]	2.392 [-1.70-30.13]	
Ingreso neto/cabeza (%)	-9.03	-9.03	-10.17	-9.77	-19.97	

Nota: los valores entre corchetes indican el rango de variación [mínimo-máximo] de la variable correspondiente.

Fuente: elaboración propia con base en estimaciones del modelo Ricardiano, Fick y Hijmans (2017).

Además de las recomendaciones sobre política económica, de este trabajo se deriva lo siguiente: primero, a pesar de los esfuerzos por calcular la renta ganadera (ingresos netos) por hectárea, la información que recolecta la ENA 2014 no permite hacerlo. Este es un problema que persiste en la literatura que utiliza el método Ricardiano en el sector pecuario, especialmente para el ganado de libre pastoreo donde no es clara la superficie que se necesita para su producción (Kabubo-Mariara, 2009). En México, se cuenta con coeficientes de agostadero a nivel estatal y con estándares de superficie para ganado estabulado. Al utilizar dichos parámetros en esta investigación, se llegó a resultados poco consistentes debido a que se asume homogeneidad en la superficie de agostadero dentro de un mismo estado y entre estructuras productivas de diferentes UP con ganado estabulado. Segundo, los resultados de esta investigación consideran el efecto directo del clima sobre los ingresos netos por cabeza, sin embargo, es importante considerar el efecto indirecto que se podría generar por los impactos del cambio climático en la disponibilidad de alimento para el ganado. De esta segunda consideración, se deriva una línea de investigación futura que se debe atender.

Es importante señalar que los resultados de estudios previos, y de este trabajo, se basan en el principio de *Ceteris paribus*; es decir, los cambios estimados resultan de mantener constantes todos los demás factores que afectan la renta de la tierra o ingresos netos. Por lo tanto, los cambios en otras variables pueden influir en los resultados. Por ejemplo, si se presenta un desarrollo importante de la red vial, esto podría reducir las pérdidas estimadas, puesto que el modelo Ricardiano sugiere que cuando se incrementa la densidad carretera, las UP suelen presentar niveles más altos de ingresos netos por cabeza de ganado.

5. CONCLUSIONES

El objetivo de este artículo es identificar los impactos del cambio climático en la ganadería en México. Para ello, se estima un conjunto de modelos Ricardianos utilizando información económica de 28 337 UP de bovinos y porcinos reportada en la ENA 2014. Los modelos Ricardianos relacionan ingresos netos por cabeza de ganado con variables climáticas, características de las UP, características sociodemográficas de los productores y factores estructurales a nivel regional mediante una regresión lineal. Utilizando diferentes grupos de productores, se pudo identificar la heterogeneidad de los impactos marginales y no marginales de cambios en el clima en el sector ganadero. Los resultados

principales sugieren que, en promedio, los cambios en los ingresos netos por cabeza de ganado podrían ubicarse en el periodo 2041-2060, entre -13.42 y -16.87%, y entre -14.42 y -33.83%, en el periodo 2081-2100, respecto a los niveles actuales como consecuencia del cambio climático. Asimismo, se encuentra que los productores especializados en una sola especie ganadera y pequeños productores son más vulnerables al cambio climático.

De los resultados de esta investigación se pueden derivar las siguientes recomendaciones de política económica: *i)* reducir las brechas de vulnerabilidad al cambio climático al diseñar e implementar programas que atiendan a productores de mayor edad, mujeres, indígenas, con menor educación y pequeños; y, *ii)* promover la diversificación de las actividades ganaderas mediante capacitación o acceso a crédito y/o financiamiento para que los productores puedan hacer inversiones que les permitan producir más de una especie, *e.g.* nuevos corrales, comederos, áreas de pastoreo, bodegas, entre otras. En términos de investigación, se sugiere continuar con los siguientes aspectos: *i)* identificar el impacto indirecto que podría tener el cambio climático en los ingresos netos de la ganadería a través de la disponibilidad de alimento para el ganado bajo diferentes escenarios de cambio climático; y, *ii)* modelar explícitamente en modelo Ricardiano las estrategias de adaptación que podrían implementar los productores para reducir su vulnerabilidad al cambio climático, *e.g.* la probabilidad de estabular al ganado de libre pastoreo.

En la interpretación de los resultados, el lector debe considerar los siguientes puntos: primero, la ENA 2014 recopila información del sector agropecuario correspondiente a un año agrícola, por lo que algunos ingresos o costos podrían no reportarse correctamente. En el caso de la ganadería, los ingresos por venta de animales de engorda o de pie de cría podrían no reportarse en el año en el que se entrevistó a los productores. Asimismo, aquellos costos de inversión o depreciación de largo plazo podrían no reportarse en el año de la encuesta, por ejemplo, compra de ganado o depreciación del hato ganadero lechero. Se considera que este error de medición se encuentra en los residuales de la estimación del modelo Ricardiano y que dicho error es aleatorio, por lo que, no influye en los valores de los parámetros estimados. Segundo, los ingresos netos por cabeza no descuentan el costo del trabajo, el costo del capital manufacturado y el costo del capital natural por cuestiones de disponibilidad de información. Por lo tanto, los ingresos netos se deben considerar como una medida de la renta de los tres factores anteriores.

AGRADECIMIENTOS

Investigación realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT-IA303221 *Impacto del cambio climático en la producción de alimentos en México*. Los autores agradecen profundamente los comentarios de las personas que revisaron versiones previas de este artículo y contribuyeron a mejorar el trabajo. Agradecemos el apoyo recibido por parte del laboratorio de microdatos y del área encargada de la Encuesta Nacional Agropecuaria en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

BIBLIOGRAFÍA

- Banco de México (BM) (2022). Tipos de cambio y resultados históricos de las subastas. Base de datos de Banco de México: <https://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?sector=6&accion=consultarCuadro&idCuadro=CF86&locale=es>
- Basurto-Hernández, S. (2019). *Essays on climate change, agriculture and production efficiency* (Doctoral dissertation, University of Birmingham). <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/9254/>
- Batsuuri, T. y Wang, J. (2017). The impacts of climate change on Nomadic livestock husbandry in Mongolia. *Climate Change Economics*, 8(03). <https://doi.org/10.1142/s2010007817400036>
- Bozzola, M., Massetti, E., Mendelsohn, R. y Capitanio, F. (2018). A Ricardian analysis of the impact of climate change on Italian agriculture. *European Review of Agricultural Economics*, 45(1). <https://doi.org/10.2139/ssrn.2983021>
- Fick, S. E. y Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12). <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2022). FAOSTAT statistical database. FAO.
- Galindo, L. M., Reyes, O. y 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). <https://doi.org/10.5897/jdae2015.0650>
- Gebreegziabher, Z., Mekonnen, A., Deribe, R., Abera, S. y Kassahun, M. M. (2013). Crop-ivestock inter-linkages and climate change implications for Ethiopia's agriculture: A Ricardian approach. *Resources For the Future*.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2014a). Encuesta Nacional Agropecuaria 2014. Microdatos: <https://www.inegi.org.mx/programas/ena/2014/>
- ____ (INEGI) (2014b). Red Nacional de Caminos RNC. 2014. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825278724>
- Kabubo-Mariara, J. (2009). Global warming and livestock husbandry in Kenya: Impacts and adaptations. *Ecological Economics*, 68(7). <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.03.002>
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D. y Shaw, D. (1994). The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis. *The American Economic Review*, 84(4). <http://www.jstor.org/stable/2118029>
- Mendelsohn, R. y Seo, S. N. (2007). A structural Ricardian analysis of climate change impacts and adaptations in South American farms. Policy Research Working Paper (No. 4161).
- ____ y Dinar, A. (2009). *Climate change and agriculture: an economic analysis of global impacts, adaptation and distributional effects*. Edward Elgar Publishing.
- ____, Arellano-Gonzalez, J. y Christensen, P. (2010). A Ricardian analysis of Mexican farms. *Environment and Development Economics*, 15(2). <https://doi.org/10.1017/s1355770x09990143> .
- Organisation for Economic Co-operation and Development (2021). OECD-FAO Agricultural Outlook. Edition 2021: <https://data.oecd.org/agroutput/meat-consumption.htm>
- Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2021). Summary for Policymakers. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (eds.). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press. In Press.
- ____ (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press. [En prensa].
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) (2021). Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta-SIACON. Edición 2021. <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>

- Seo, S. N. (2016). Modeling farmer adaptations to climate change in South America: a micro-behavioral economic perspective. *Environmental and Ecological Statistics*, 23(1). <https://doi.org/10.1007/s10651-015-0320-0>.
- _____ y Mendelsohn, R. O. (2007a). Climate change impacts on animal husbandry in Africa: A Ricardian analysis. *World Bank Policy Research Working Paper*, (4261). https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=996167
- _____ y Mendelsohn, R. O. (2007b). *The impact of climate change on livestock management in Africa: a structural Ricardian analysis*, vol. 4279. World Bank Publications. <http://hdl.handle.net/10986/7463>
- _____ y Mendelsohn, R. O. (2008a). Animal husbandry in Africa: climate change impacts and adaptations. *African Journal of Agricultural and Resource Economics*, 2(311-2016-5520). <https://ageconsearch.umn.edu/record/56968/>
- _____ y Mendelsohn, R. O. (2008b). *A structural Ricardian analysis of climate change impacts and adaptations in African agriculture*, vol. 4603. World Bank Publications. <http://hdl.handle.net/10986/6770>
- _____ y Mendelsohn, R. O. (2008c). Climate change impacts on Latin American farmland values: the role of farm type. *Revista de Economia e Agronegocio/Brazilian Review of Economics and Agribusiness*, 6(822-2016-54194). <https://ageconsearch.umn.edu/record/53872>
- _____ y Mendelsohn, R. O. (2008d). Measuring impacts and adaptations to climate change: a structural Ricardian model of African livestock management 1. *Agricultural economics*, 38(2). <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2007.00289.x>
- Tibesigwa, B., Visser, M. y Turpie, J. (2017). Climate change and South Africa's commercial farms: an assessment of impacts on specialised horticulture, crop, livestock and mixed farming systems. *Environment, Development and Sustainability*, 19(2). <https://doi.org/10.1007/s10668-015-9755-6>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2019). World Population Prospects 2019, Online Edition. Rev. 1.
- Van Passel, S., Massetti, E. y Mendelsohn, R. (2017). A Ricardian analysis of the impact of climate change on European agriculture. *Environmental and Resource Economics*, 67(4). <https://doi.org/10.2139/ssrn.2463134>