



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

EL CAMBIO DE USO DEL SUELO AGRÍCOLA
ASOCIADO AL CONSUMO DE ALIMENTOS DE
ORIGEN ANIMAL EN MÉXICO ENTRE 1961 Y 2017.

T E S I S

Que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Ecología)

P r e s e n t a

José Antonio Tello Carrasco

La Paz, Baja California Sur, febrero de 2020.

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 13:00 horas del día 04 del mes de febrero del 2020, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

EL CAMBIO DE USO DEL SUELO AGRÍCOLA ASOCIADO AL CONSUMO DE ALIMENTOS DE ORIGEN ANIMAL EN MÉXICO ENTRE 1961 Y 2017

Presentada por el alumno:

José Antonio Tello Carrasco

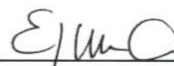
Aspirante al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN: **Ecología.**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

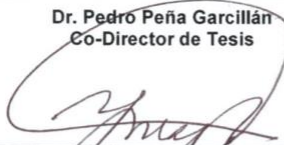
LA COMISIÓN REVISORA



Dr. Pedro Peña Garcillán
Co-Director de Tesis



Dr. Exequiel Ezcurrea
Co-Director de Tesis



Dra. Yolanda Lourdes Maya Delgado
Co-Tutor



Dr. Gerardo Bocco
Co-Tutor



Dr. Domingo Alcaraz Segura
Co-Tutor



Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro,
Directora de Estudios de Posgrado y
Formación de Recursos Humanos

Conformación de comités

Comité tutorial

Dr. Pedro Peña Garcillán
Co-Director de Tesis
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
Dr. Exequiel Ezcurra
Co-Director de Tesis
University of California-Riverside
Dr. Gerardo Bocco
Co-Tutor
Centro de investigaciones en Geografía Ambiental (UNAM)
Dra. Yolanda Maya Delgado
Co-Tutora
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
Dr. Domingo Alcaraz Segura
Co-Tutor
Universidad de Granada

Comité revisor de tesis

Dr. Pedro Peña Garcillán
Dr. Exequiel Ezcurra
Dr. Gerardo Bocco
Dra. Yolanda Maya Delgado
Dr. Domingo Alcaraz Segura

Jurado de examen

Dr. Pedro Peña Garcillán
Dr. Exequiel Ezcurra
Dr. Gerardo Bocco
Dra. Yolanda Maya Delgado
Dr. Domingo Alcaraz Segura

Suplentes

Dr. Alejandro Manuel Maeda Martínez
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
Dra. Patricia Cortés Calva
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste

Resumen

La transición nutricional hacia las dietas occidentales ocurre en múltiples niveles, impactando sobre la salud humana y las sociedades, pero también sobre el medio ambiente. En México, como en otros países, el cambio en los patrones de consumo y producción de alimentos, y particularmente de los alimentos de origen animal (AOA), ha producido cambios en el uso de los terrenos agrícolas. En este trabajo estudiamos el cambio generado por el aumento en el consumo de AOA sobre el uso de los terrenos agrícolas en México desde 1961. Utilizamos datos oficiales y públicos de México, de la Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), y del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). Nuestros resultados muestran que una proporción cada vez mayor del área total cultivada se dedica a la producción de cultivos forrajeros, así como una correlación creciente entre el cambio en la superficie de cultivos forrajeros y el cambio en la frontera agrícola. Discutimos la relevancia del maíz con base en su doble uso potencial como alimento humano directo y como alimento para consumo animal. Observamos una tendencia creciente de las importaciones de granos forrajeros desde Estados Unidos y estimamos que se requería de 5 millones de hectáreas de superficie agrícola adicional para cubrir esa demanda con producción nacional. Discutimos las principales amenazas ambientales potencialmente relacionadas con la intensificación de la producción ganadera y sugerimos que hay oportunidades disponibles para adoptar dietas sostenibles y saludables.

Palabras clave: Cambio de uso de suelo, Producción ganadera, Sistema alimentario, Sustentabilidad, Transición nutricional.

Vo. Bo.



Dr. Pedro Peña Garcillán

Co-Director de Tesis

Vo. Bo



Dr. Exequiel Ezcurra

Co-Director de Tesis

Summary

The nutrition transition towards western diets occurs at multiple levels, impacting health and society but also the environment. In Mexico, as in other countries, the shift in food consumption and production patterns, particularly in relation to animal source foods (ASF), has changed land use. We studied the consumption and production of ASF in Mexico since 1961, and the associated change in the use of agricultural land. We used official data of Mexico, from the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), and from the U. S. Department of Agriculture (USDA). Our findings show an increasing proportion of farmed area devoted to the production of feed crops, and an increasing correlation between the change in the area of feed crops and the change in the agricultural frontier. We discuss the relevance of maize because of its potential double use as direct human food and as feed for animal consumption. We observe that imports from the US of grains for animal consumption are growing and estimated in 5 million ha the additional agricultural area required to substitute those imports with national production. We discuss how the intensification of livestock production is associated to major environmental threats and suggest that opportunities are available for sustainable and healthy food options.

Keywords: Land use change, Livestock production, Food system, Sustainability Nutrition transition.

Vo. Bo.



Dr. Pedro Peña Garcillán

Co-director de Tesis

Vo. Bo



Dr. Exequiel Ezcurra

Co-director de Tesis

Dedicatoria

A quienes este trabajo pueda resultar útil.

A mis seres queridos.

Agradecimientos

A todas las personas que colaboran en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. (CIBNOR), especialmente al equipo de la Dirección de Estudios de Posgrado por su apoyo: Dra. Gracia Alicia Gómez, Dra. Norma Yolanda Hernández, Lic. Osvelia Ibarra, Tania Núñez. y al Ing. Horacio Sandoval, también a la Lic. Leticia González, del Departamento de Becas, y al personal de la Biblioteca Dr. Daniel Lluch Belda.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por realizar la labor fundamental de administrar los recursos públicos para impulsar el desarrollo científico y tecnológico de México. En mi caso, fui beneficiario de la beca 503182 para realizar este trabajo de investigación.

A los Co-directores de esta tesis, Dr. Pedro Peña Garcillán, por compartir conmigo su gran inteligencia y capacidad analítica, y por transmitirme la seriedad del trabajo académico, por su paciencia y amistad. Al Dr. Exequiel Ezcurra, por su inmensa amabilidad y generosidad con su tiempo y conocimientos, fue una verdadera fortuna haber podido contar con su orientación y visión única de las cosas. La complementación alcanzada entre ambos Co-directores fue una de las claves para concluir esta investigación.

A los integrantes de mi comité tutorial por su profesionalismo y apoyo, por sus observaciones siempre positivas en el desarrollo de este proceso: Dra. Yolanda Maya, Dr. Gerardo Bocco y Dr. Domingo Alcaraz, en particular a este último por su exhaustiva revisión del documento final de tesis.

Por su servicio y atención, a los trabajadores del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y de la Biblioteca Ing. José Luis de la Loma y de Oteyza del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP).

Al Dr. Bocco, profesores y personal del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA) por recibirme. A las doctoras Wendy De Boer y Andera Kaus y a todo el equipo de UCMEXUS por sus atenciones. Así como a la Dra. Charlotte González y al Dr. Andrew Semotiuk por el entrenamiento en sistemas de información geográfica. Finalmente, al Dr. Benjamín Troyo y a todas las personas que contribuyeron de alguna manera a la realización de esta tesis.

A mis padres, hijo, familia y amigos, quienes me impulsaron para llegar a la meta.

Contenido

Resumen	i
Summary	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	4
3. JUSTIFICACIÓN	5
3.1. Pregunta de investigación	6
4. HIPÓTESIS	6
5. OBJETIVOS	6
5.1. Preguntas, hipótesis y objetivos específicos	7
6. MATERIALES Y MÉTODOS	9
6.1 Planteamiento general	9
6.2 Población humana	12
6.3 Alimentos de origen animal (AOA)	12
6.4 Cultivos forrajeros	13
6.5 Superficie de tierra cosechada de cultivos forrajeros	17
6.6 Superficie de tierra agrícola donde se cultivan los forrajes importados	18
6.7 Área cosechada total	18
6.8 Análisis a nivel estatal (1980-2017)	18
6.9 Riesgos ambientales	20
7. RESULTADOS	21
7.1 Población humana y consumo de alimentos de origen animal (AOA)	21
7.2 Producción nacional e importaciones de AOA	24
7.3 Consumo, producción e importaciones de productos forrajeros	27
7.4 Uso de suelo agrícola	29
7.5 Rendimientos agrícolas	32
7.6 Maíz	33
7.7 Relación entre la producción animal y la superficie agrícola en México	34
7.7.1 A nivel del país	34
7.7.2 A nivel de los estados	36
7.8 Riesgos ambientales	40
8. DISCUSIÓN	42
Nivel 1: El volumen consumido de AOA está determinado por el tamaño de la población humana y por sus hábitos alimenticios	42
Nivel 2. El consumo de los AOA se satisface mediante la producción nacional o importación de estos productos	43

Nivel 3. La producción ganadera nacional se sostiene sobre los forrajes cultivados en el país e importados.	44
Nivel 4. El cultivo de los forrajes consumidos en México se realiza en terrenos ubicados dentro y fuera del país, principalmente en Estados Unidos.	45
Nivel 5. El maíz es el cultivo más representativo de México y es un objeto fundamental de estudio.....	46
Nivel 6. ¿Cómo se manifiesta la relación entre la producción de AOA y los cambios en el uso de suelo agrícola en los estados de México?	47
Nivel 7. La intensificación de la producción ganadera se relaciona con diferentes riesgos ambientales sobre la tierra, agua y aire.	49
9. CONCLUSIONES	53
10. LITERATURA CITADA	56
11. ANEXOS	66
Anexo A. Estimación de las tasas de cambio	66
Anexo B. Dinámica de la producción a AOA y el cultivo de forrajes en los estados de México entre 1980 y 2017	67
Anexo C. Población y sacrificios de ganado bovino	70
Anexo D. Principales reformas jurídicas a la regulación de la tenencia de la tierra que se relacionan con la ganadería en México entre 1943 y 1991	72

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de los niveles de análisis de la relación entre el aumento del consumo de alimentos de origen animal y el cambio de uso del suelo agrícola en México.....	11
Figura 2. Crecimiento de la población total y urbana en México entre 1900 y 2015.	21
Figura 3. Consumo agregado de carne y huevo en México entre 1961 y 2013. Incluye carne de bovino, aves de corral y cerdo, así como huevos.	22
Figura 4. Consumo de proteína por fuente animal y vegetal en México entre 1961 y 2013. Porcentaje del total de proteína consumida per cápita por tipo de origen.	23
Figura 5. Consumo per cápita agregado de carne y huevo en México entre 1961 y 2013.	23
Figura 6. Consumo per cápita de los cuatro tipos principales de alimento de origen animal en México entre 1961 y 2013.	24
Figura 7. Producción nacional de carne (res, pollo y cerdo) y huevo en México entre 1961 y 2013.	25
Figura 8. Proporción del consumo de pollo, res, y cerdo que se produjo en México entre 1961 y 2013.	26
Figura 9. Importaciones mexicanas de carne (res, pollo y cerdo) entre 1961 y 2013.	27
Figura 10. Consumo total, producción nacional e importaciones de cultivos forrajeros en México entre 1961 y 2013.	28
Figura 11. Consumo, producción e importaciones de granos forrajeros (maíz, sorgo y soya) en México entre 1961 y 2013.	29
Figura 12. Superficie de tierra cosechada en México entre 1961 y 2013, dedicada a cultivos de consumo humano directo y a cultivos de consumo animal.	30
Figura 13. Incremento anual de la superficie sembrada total y de forrajes cultivados entre 1980 y 2017 a nivel nacional.	31
Figura 14. Cambio de la superficie total de forrajes cultivados como porcentaje del cambio de la superficie sembrada total. Cambios anuales entre 1980 y 2017. Año base=1980.	31
Figura 15. Estimación de la superficie de cultivo de los forrajes importados por México entre 1961 y 2013.	32
Figura 16. Consumo de maíz en México de acuerdo al destino de uso entre 1961 y 2013.	33
Figura 17. Producción e importación de maíz en México de acuerdo a tipo de consumo entre 1961 y 2013.	34
Figura 18. Dinámica temporal de la producción animal (carne y huevo) y la superficie de forraje cultivado en México entre 1961 y 2017. Círculos grises: producción de carne y huevo (toneladas); círculos negros: superficie de cultivos forrajeros (hectáreas).	35
Figura 19. Intensificación productiva expresada en hectáreas (ha) de cultivos forrajeros por cada tonelada (t) de carne y huevo producida en México.	35

Figura 20. Crecimiento relativo de la producción de carne y huevo (círculos blancos) y de la superficie de forraje cultivado (círculos negros) respecto a su valor de 1980. Estados con crecimiento relativo de la producción de AOA superior al de la superficie de forrajes cultivados. Nótese que el eje Y representa intervalos de diferente tamaño.	36
Figura 21. Crecimiento relativo de la producción de carne y huevo (círculos blancos) y de la superficie de forraje cultivado (círculos negros) respecto a su valor de 1980. Estados con crecimiento relativo de la producción de AOA inferior al de la superficie de forrajes cultivados. Nótese que el eje Y representa intervalos de diferente tamaño.	37
Figura 22. Crecimiento relativo de la producción de carne y huevo (círculos blancos) y de la superficie de forraje cultivado (círculos negros) respecto a su valor de 1980. Estados con crecimiento relativo de la producción de AOA similar al de la superficie de forrajes cultivados. Nótese que el eje Y representa intervalos de diferente tamaño (B.C.S.=Baja California Sur).	38
Figure 23 a y b. Correlación en el conjunto de los estados entre la superficie de forraje cultivado y la producción de carne y huevo en dos periodos: a) 1980 a 1982; y b) 2015 a 2017. Los valores corresponden al promedio de los tres años indicados. Cada punto corresponde a un estado. Puntos negros indican valores extremos no incluidos en el modelo. La línea indica el modelo potencial, que es el que mejor expresó el cambio de la correlación en el tiempo.....	39
Figura 24. Cambio del área sembrada total respecto al cambio del área de forrajes cultivados en los estados de México en tres periodos:1980 a 1993, 1993 a 1997, y 1997 a 2017.	40
Figura 25. Inventario y sacrificios de bovinos en México entre 1960 y 2013.	72
Figure 26. Distribución de la producción de carne-huevo. Lado izquierdo se muestran valores absolutos y en el derecho porcentajes. Puntos grises oscuros corresponden a 1980 y los grises claros a 2017.	70
Figura 27. Superficie forrajera en México agregada a nivel nacional entre 1980 y 2017.	71
Figura 28. Distribución de la producción de la superficie de forrajes cultivados entre estados. Lado izquierdo se muestran valores absolutos y en derecho los porcentajes.....	72

Lista de tablas

Tabla I. Preguntas, hipótesis y objetivos específicos	7
Tabla II. Esquema de los niveles de análisis con referencia a hipótesis, objetivos y secciones.....	10
Tabla III. Clasificación de los cultivos forrajeros.....	14
Tabla IV. Cultivos considerados como forrajeros a partir de SADER (2019).	19
Tabla V. Tasas medias de crecimiento anual (% valor $\pm \sigma$) en alimentos de origen animal (carne + huevos) durante el período 1961–2013 en México.	25
Tabla VI. Fuentes de información sobre el hato de bovinos en el siglo XX.....	71

1. INTRODUCCIÓN

Respecto a los hábitos alimenticios, las sociedades actuales convergen hacia una dieta alta en grasas saturadas, azúcar, alimentos refinados, pero baja en fibra, denominada <<dieta occidentalizada>>, ligada también a niveles bajos de actividad física (Popkin 1997; Rockström et al. 2016). Esta dieta demanda una transformación de la producción de alimentos que afecta al sistema de producción agrícola y a los servicios ecológicos de los ecosistemas asociados a la producción de alimentos (Herrero y Thornton 2013; Eshel et al. 2014; Rööös et al. 2017; Pikaar et al. 2018; Poore y Nemecek 2018; Willet 2019). La intensificación de la producción de alimentos incide en el cambio de uso de suelo, la fragmentación de los ecosistemas, la diversidad biológica, el cambio climático y la disponibilidad de agua (Turner et al., 1994; Vitousek et al., 1997; Thornton 2010; Wirsenius et al., 2010).

El cambio en la ingesta de proteína de origen vegetal a proteína animal, que se intensificó desde mediados del siglo 20 (Kastner et al. 2012; Herrero y Thornton 2013), responde en gran medida al consumo de las crecientes clases medias urbanas (Popkin y Gordon-Larsen 2004; Sans y Combris 2015). Sin embargo, esta transición no ha sido generada solo por razones económicas sino también por factores geográficos, religiosos y culturales (Drewnowski y Poulain 2018). Además, se relaciona con características y procesos históricos específicos de cada país (Kastner y Nonhebel 2010).

Se ha estudiado el desarrollo de la ganadería bovina como causa crítica de la deforestación tropical en Centro y Sudamérica, principalmente en las décadas de 1970 y 1980 (Myers 1981), aunque aún hoy es un factor de cambio del régimen de uso de suelo y de riesgos ambientales con efectos regionales y globales, como en Brasil, Colombia y Australia (McAlpine et al. 2009; Ramankutty y Coomes 2016; Swain et al. 2018).

Por otro lado, Kastner et al. (2012) descubrieron que en la mayoría de las regiones del mundo las dietas se han enriquecido mientras que la superficie de tierra usada para alimentar a una persona ha disminuido. Sin embargo, observaron que

el ahorro potencial de superficie agrícola, por medio del aumento de los rendimientos de los cultivos, se compensó con una combinación de crecimiento de la población y cambio en la dieta. En otro estudio, Kastner y Nonhebel (2010) muestran resultados similares en Filipinas: durante el siglo 20 el suministro promedio de alimentos per cápita mejoró, mientras que la cantidad de tierra requerida para alimentar a una persona disminuyó, aunque no de manera continua.

El aumento del consumo de proteína de origen animal se asocia con el incremento en el ingreso (PIB per cápita) (Delgado 2003; Keyzer et al. 2007; Gerbens-Leenes et al. 2010; Sans y Combris 2015). Con desarrollo socioeconómico, generalmente el crecimiento de la población disminuye y, al mismo tiempo, las dietas se vuelven más ricas. Es decir que, en algunos contextos, el cambio en la dieta puede anular el crecimiento de la población como el principal impulsor de los requisitos de tierra para alimentos en el futuro (Kastner et al. 2012). Sin embargo, en los países en desarrollo se registran patrones de aumento acelerado en la producción y consumo de alimentos de origen animal (AOA), con tasas aún importantes de crecimiento poblacional urbano (Delgado 2003; Sans y Combris 2015), lo que incide en los cambios de uso de suelo.

Existen grandes diferencias en los requerimientos de superficie agrícola para la producción de los diferentes tipos de carne. El ganado vacuno tiene el mayor requerimiento, mientras que los pollos de engorda tienen el menor. Entre otras cosas, estas diferencias se vinculan con los rendimientos y valor nutritivo de los forrajes (Elferink y Nonhebel 2007; Swain et al. 2018).

Se estima que más del 60% de la superficie de tierra cultivable a nivel mundial se utiliza para la producción de forrajes, esta superficie sigue aumentando vinculada al aumento de la producción y consumo de AOA (Elferink y Nonhebel 2007). Asimismo, se registra una tendencia global de cambio en la producción de cereales de consumo humano directo hacia alimento para el ganado, como el reportado para la India por Pingali et al. (2019). Finalmente, se comienzan a generar expectativas en torno a métodos de producción que podrían reducir la demanda de

área de cultivo, como la producción industrial de proteínas microbianas (Pikaar et al. 2018).

Para dar contexto a la relación del cambio de dieta sobre el sistema productivo y el uso de suelo agrícola en México en el último medio siglo exponemos los siguientes datos:

- En 1960 México era el 16º país más poblado del mundo y hoy ocupa el décimo lugar.
- Entre 1961 y 2013 la población creció de 32.4 a 118.1 millones de habitantes (265%). La población urbana aumentó del 48% al 78% de la población nacional (INEGI 2017).
- Entre 1961 y 2013, el ingreso per cápita aumentó 144%, de 3967 a 9693 dólares (precios constantes de 201) (Banco Mundial 2018).
- Alrededor de 52 millones de personas (41.9% de la población) viven en situación de pobreza actualmente (CONEVAL 2019).
- En 1975, 13.5% de la población presentaba sobrepeso y obesidad; 1.9% correspondía a niños (WHO, 2018). En 2016, el porcentaje en adultos aumentó a 72.5% y en la población en edad escolar a 33.2% (Rivera-Dommarco et al. 2018).
- Entre 1965 y 2017 el valor de la producción agropecuaria creció de 1151 a 29,844 millones de dólares (mdd) (2500%). Las importaciones pasaron de cero a 27,172 mdd (BANXICO 1965; Reig 1985; SAGARPA 2017).

2. ANTECEDENTES

Hasta mediados del siglo 20 la dieta mexicana se basaba principalmente en el maíz, los frijoles y los chiles cultivados bajo métodos agrícolas tradicionales, como las milpas y las terrazas agrícolas (campos de maíz intercalados con otros cultivos) y las chinampas (islotas agrícolas hechos por seres humanos en las zonas poco profundas de los lagos). Las hierbas de los campos de maíz se cosechaban y consumían como quelites, y las milpas a menudo se cultivaban junto con frijoles, tomates, tomatillos verdes y calabazas, entre otras especies. Los granos de maíz se trataban con cal antes de triturarse para hacer alimentos básicos cotidianos, como tortillas o tamales, en un proceso conocido como nixtamal que aumenta la cantidad nutricional de calcio y niacina. Los aguacates y el cacao, junto con una diversidad de frutas, tanto de árboles perennes como de cultivos anuales, complementaban esta dieta. México está orgulloso de su dieta tradicional y nominó con éxito la cocina tradicional mexicana para inscribirse en 2010 en la Lista del Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad de la UNESCO. Entre otros elementos, el documento de nominación subrayó la importancia de la cocina tradicional como un medio de desarrollo sostenible (UNESCO 2010).

A pesar del interés científico y cultural de la dieta tradicional mexicana, el consumo de alimentos cambió drásticamente en México durante la segunda mitad del siglo 20 y continúa cambiando hoy. Se trata de un cambio profundo observado a nivel global y que se relaciona con procesos de urbanización, crecimiento económico, cambio tecnológico y cambio cultural (Popkin y Gordon-Larsen 2004; Willet 2019). El acceso a dietas saludables se ha dificultado debido a falta de disponibilidad de alimentos, el tiempo reducido para comprar, cocinar y almacenarlos, y debido a los precios de los mismos (Popkin y Gordon-Larsen 2004). En México, Colchero et al. (2019) descubrieron que los alimentos industrializados, densos en energía y con menor calidad nutritiva, eran económicamente más accesibles que los alimentos más saludables, como los productos frescos, especialmente para la población de bajos ingresos. Los investigadores en México han estado monitoreando esta transición debido a las preocupaciones sobre el

impacto del cambio de dieta en la salud pública. Flores et al. (2010), por ejemplo, reportan que los patrones dietéticos modernos aumentan significativamente el riesgo de sobrepeso u obesidad en comparación con la dieta tradicional mexicana, similar a lo encontrado para otras regiones del mundo (Popkin y Gordon-Larsen 2004; Rivera et al. 2014; Rivera-Dommarco et al. 2018). La ingesta relativamente alta de proteína animal y grasas saturadas también se ha relacionado con el aumento de la probabilidad de padecer enfermedades cardiovasculares y cáncer (Popkin y Du 2003). Los crecientes costos del aumento de las enfermedades relacionadas con la dieta han prendido las alarmas: la incidencia de diabetes aumentó en México del 6.7% en 1994 al 15.9% en 2015 (la más alta entre los países de la OCDE) (OCDE 2015), y le costaba a principios de esta década al sistema de salud mexicano 1,200 millones de dólares al año (Barquera et al. 2013).

Las consecuencias del incremento de las bebidas azucaradas en la transición nutricional en México han sido ampliamente analizadas (Aburto et al. 2016; Sánchez-Pimienta et al. 2016), sin embargo, ha sido menos estudiado el papel del consumo de alimentos de origen animal (AOA) en dicha transición nutricional y sus efectos ecológicos y para la salud. Aunque existen estudios que han examinado diversos aspectos de esta relación (Barkin 1981; Narchi et al. 2015; Galván-Miyoshi et al. 2015; Galván 2016; Ibarrola-Rivas y Granados-Ramírez 2017), no se ha estudiado esta asociación a lo largo del periodo completo en que ha ocurrido.

3. JUSTIFICACIÓN

Los cambios en la dieta que se extienden ampliamente entre la población influyen sobre la salud humana, pero también producen cambios en los sistemas de producción de alimentos y finalmente en los sistemas ecológicos que los sustentan (Kastner et al. 2012; Herrero y Thornton 2013; Sans y Combris 2015).

En México se han estudiado extensamente las consecuencias que la transición hacia la dieta <<occidentalizada>> ha tenido sobre la salud humana (Flores et al. 2010; Barquera et al. 2013; Rivera et al. 2014; OCDE 2015; Aburto et

al. 2016; Sánchez-Pimienta et al. 2016; Rivera-Dommarco et al. 2018). También ha sido ampliamente analizado el efecto sobre la deforestación relacionada con la expansión del sistema extensivo de producción de carne y leche de bovinos en los años setenta (Dirzo y García 1992; Banco Mundial 1995; Velázquez et al. 2002; Mas et al. 2004; Díaz-Gallegos 2010; Moreno-Unda 2011). Sin embargo, no se había investigado sobre la relación entre el crecimiento continuo de la demanda de proteína de origen animal, la intensificación del sistema productivo y el cambio de uso de suelo agrícola desde la segunda mitad del siglo 20.

3.1. Pregunta de investigación

La pregunta de investigación que pretendemos responder es cómo ha cambiado el uso del suelo como consecuencia del creciente consumo de alimentos de origen animal en México, tanto a escala nacional como de los estados. Además, exploramos los principales riesgos ambientales relacionados con este cambio del uso del suelo.

4. HIPÓTESIS

El aumento en el consumo de proteína de origen animal produce la intensificación del sistema de producción ganadera y genera cambios en el uso del suelo agrícola.

5. OBJETIVOS

El presente estudio se dirige a analizar los efectos de la intensificación de la producción de alimentos de origen animal (AOA), en concreto, la doble relación compuesta por 1) el cambio de dieta sobre el sistema productivo de AOA y 2) el cambio del sistema productivo de AOA sobre el cambio de uso de suelo agrícola.

Nuestro objetivo se expresa de la siguiente forma:

Analizar la relación entre el consumo y producción de alimentos de origen animal y el cambio de uso de suelo agrícola a escala nacional y estatal de México, desde mediados del siglo 20.

5.1. Preguntas, hipótesis y objetivos específicos

Tabla I. Preguntas, hipótesis y objetivos específicos

Preguntas específicas	Hipótesis	Objetivos
1. ¿Cuánto ha aumentado el consumo de AOA en México?	1.1 Como en otros países en vías de desarrollo, en México ha aumentado el consumo de AOA, como parte de una rápida transición hacia las <<dietas occidentales>> 1.2 El incremento de la demanda agregada de AOA está asociado al crecimiento de la población	1. Analizar los cambios en el volumen de demanda agregada y de consumo per cápita de AOA
2. ¿Cómo se ha modificado la oferta de AOA en México, entre lo producido nacionalmente y lo importado?	2. Para satisfacer la creciente demanda de AOA se ha incrementado tanto la producción interna como las importaciones de estos productos	2. Analizar el cambio en el volumen de producción nacional e importaciones de AOA
3. ¿Cómo ha cambiado el sistema de producción ganadera en relación con el aumento de la demanda de proteína de origen animal?	3. La creciente demanda de proteína de origen animal ha impulsado la intensificación del sistema de producción de AOA México	3. Analizar la relación entre el crecimiento de la demanda de proteína de origen animal y los cambios en el sistema de producción de AOA a nivel nacional
4. ¿Cómo ha cambiado la oferta de productos forrajeros, entre lo producido nacionalmente y lo importado?	4. Para satisfacer la creciente demanda de productos forrajeros se ha incrementado tanto la producción interna como las importaciones de forrajes	4.1 Analizar el comportamiento de la producción nacional y de las importaciones de forrajes. 4.2 Analizar la relación entre el crecimiento de la producción de AOA y el crecimiento de la producción de forrajes a nivel nacional

Preguntas específicas	Hipótesis	Objetivos
5. ¿Cómo se manifiestan los principales cambios del uso de suelo agrícola derivados de la intensificación de la producción ganadera?	5.1. La producción de AOA ha estado acoplada a los cambios en la superficie de cultivos forrajeros 5.1 La superficie agrícola total ha aumentado debido al aumento de la superficie agrícola de forrajes 5.2 Ha aumentado la proporción de la superficie agrícola de forrajes respecto a la de cultivos de consumo humano directo	Analizar la relación entre: 5.1 Producción de AOA y superficie de cultivos forrajeros 5.2 Superficie de cultivos forrajeros y superficie de cultivos de consumo humano directo 5.3 Superficie de cultivos forrajeros y superficie agrícola total
6. ¿Cómo ha cambiando la producción y el consumo de maíz en México? Considerando su doble uso potencial, como forraje y como alimento de consumo humano directo	6.1 Su producción ha disminuido debido a las crecientes importaciones de este producto. 6.2 Su consumo humano directo no ha disminuido pero el uso como forraje ha aumentado	6. Analizar el comportamiento de la producción nacional y de las importaciones de maíz destinadas a consumo del ganado y de los seres humanos
7. ¿Cómo se manifiesta la relación entre la producción de AOA y los cambios en el uso de suelo agrícola en los estados de México?	A nivel estatal, el aumento de la producción de AOA: 7.1 Ha estado acoplado al aumento de la superficie agrícola para cultivar forrajes. 7.2 Ha estado acoplado al crecimiento de la superficie agrícola total	7. Analizar la relación entre los cambios en la producción de AOA y cambios de uso de suelo agrícola y el crecimiento de la superficie agrícola total a nivel de los estados entre 1980-2017
8. ¿Cuáles son los riesgos ambientales relacionadas con la intensificación de la producción ganadera?	8.1 Además del cambio de uso de suelo agrícola, la intensificación de la producción ganadera requiere un mayor uso de agua, fertilizantes y pesticidas 8.2. La intensificación del sistema ralentiza el cambio de uso de suelo y las emisiones de GEI	8. Analizar los principales riesgos ambientales relacionados el cambio del uso de suelo agrícola derivado de la intensificación de la producción ganadera

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Planteamiento general

Analizamos las consecuencias del incremento en el consumo de productos de origen animal sobre el uso de los terrenos agrícolas durante los últimos 60 años en México, por medio del estudio de las relaciones siguientes:

- Entre la creciente producción pecuaria nacional y la producción de cultivos forrajeros tanto de origen nacional como importados.
- Entre la superficie de cultivos forrajeros y la superficie agrícola de cultivos de consumo humano directo en México. En este punto incluimos el ejemplo del maíz porque expresa la duplicidad de consumo: animal o humano directo.
- Entre la superficie de cultivos forrajeros y la superficie agrícola total.
- En el ámbito geográfico de los estados analizamos el vínculo entre la producción pecuaria y el uso agrícola del suelo entre 1980-2017, por medio de dos relaciones: (1) producción pecuaria-superficie de cultivos forrajeros; y (2) superficie de cultivos forrajeros-superficie agrícola total.
- Adicionalmente, analizamos los principales riesgos ambientales asociados a la intensificación del sistema productivo.

En la Tabla (II) presentamos un esquema de los diferentes niveles de nuestro análisis con referencia a las hipótesis y objetivos específicos que establecimos para cada nivel, así como a las distintas secciones donde se abordan. Posteriormente, en la Figura 1 (Fig. 1) se ofrece un diagrama que muestra la relación entre los diferentes niveles de análisis que abordamos.

Tabla II. Esquema de los niveles de análisis con referencia a hipótesis, objetivos y secciones

Nivel	Tabla I		Subsecciones
	Hipótesis	Objetivos	Métodos
1. El volumen consumido de AOA está en gran medida determinado por el tamaño de la población humana y por sus hábitos alimenticios	1.1. y 1.2	1	8.2, 8.3.1
2. El consumo de AOA se satisface mediante la producción nacional o importación de estos productos	2 y 3	2 y 3	8.3.2, 8.3.3
3. La producción ganadera se sostiene sobre el pastoreo extensivo (variable no considerada) y sobre los forrajes cultivados internamente e importados	4	4.1 y 4.2	8.4.1, 8.4.2, 8.4.3
4. El cultivo de los forrajes consumidos en México se realiza en terrenos ubicados dentro y fuera de este país	5.1 5.2 y 5.3	5.1, 5.2 y 5.3	8.5, 8.6, 8.7
5. El maíz es el cultivo más representativo de México y es un objeto fundamental de estudio	6.1 y 6.2	6	8.4.1.1, 8.4.2.1, 8.5.1
6. Relación entre la producción de AOA y los cambios en el uso de suelo agrícola en los estados de México	7.1 y 7.2	7	8.8
7. La intensificación de la producción ganadera se relaciona con diferentes riesgos ambientales sobre la tierra, agua y aire	8.1 y 8.2	8	8.9

5 Maíz

7 Riesgos
ambientales

Figura 1. Diagrama de los niveles de análisis de la relación entre el aumento del consumo de alimentos de origen animal y el cambio de uso del suelo agrícola en México.

6.1.1 Delimitación temporal

El marco temporal de nuestro estudio es el período de 1961 a 2013, para el que existen series temporales de datos sobre todas las variables que analizamos a nivel nacional. Asimismo, incluimos un período diferente para tres variables: área cosechada y población de ganado bovino (1950-2013), para mostrar una tendencia extendida del patrón de cambio del hato ganadero y del uso de los terrenos agrícolas en el siglo 20; y los pesticidas (1990-2013), porque los datos están disponibles solo desde 1990. Analizamos las relaciones a nivel estatal para el intervalo 1980-2017, sobre el que existe disponibilidad de datos oficiales con esta resolución espacial (SAGARPA 2019).

En algunos casos los datos están fraccionados temporalmente entre distintas fuentes oficiales. En esos casos, construimos las series temporales de las variables de interés integrando diferentes fuentes oficiales y, cuando fue necesario, haciendo interpolaciones para cubrir vacíos de información.

6.2 Población humana

Elaboramos la serie de población humana en México con base en los censos de población por década (1960 a 2010) y encuestas quinquenales (1995, 2005 y 2015; INEGI 2017). Interpolamos los valores anuales entre censos con base en la tasa de crecimiento ocurrida entre éstos (Anexo A).

6.3 Alimentos de origen animal (AOA)

6.3.1 Consumo de AOA

Con base en los datos anuales de producción, importación y exportación de productos animales de FAOSTAT (FAO 2017) (carne de res, cerdo, aves de corral, leche y huevos) construimos las series de consumo total (producción más importaciones menos exportaciones) y consumo per cápita: volumen de producción (kg) entre la población total por año. Usando la misma fuente (sección de balances alimentarios), estimamos las series temporales de participación de productos

animales en la ingesta total de energía y del suministro proteínico en la población mexicana.

6.3.2 Producción nacional e importaciones de AOA

Usamos las series temporales de producción e importaciones de AOA de FAOSTAT (FAO 2017).

6.3.3 Tasas medias de crecimiento anual en alimentos de origen animal (carne + huevos)

Calculamos las tasas medias de crecimiento anual (Anexo A) y la desviación estándar (σ) de la producción nacional, el consumo (producción nacional + importaciones netas), y del consumo per cápita (consumo dividido por el tamaño de la población nacional para el periodo 1961 a 2013).

6.4 Cultivos forrajeros

6.4.1 Consumo de cultivos forrajeros

Consideramos como cultivos forrajeros todos aquellos destinados a consumo animal. Siguiendo fuentes oficiales mexicanas (SAGARPA 2016) y de Estados Unidos (USDA 2017) consideramos tres tipos de cultivos forrajeros: (a) granos y semillas oleaginosas, (b) forrajes en verde, seco y heno (<<achicalado>>), y (c) pastos y praderas cultivados (Tabla III).

Tabla III. Clasificación de los cultivos forrajeros.

a) Granos y oleaginosas	b) Forrajes	c) Pastos y praderas cultivadas
Granos: sorgo, maíz, avena, cebada y trigo. Semillas oleaginosas: subproductos de soya, copra, algodón, maní, colza y girasol.	Plantas de alfalfa, avena y cebada consumidas en verde, seco y heno	Pastos y praderas cultivadas consumidos en seco y heno

A continuación, describimos el procedimiento que seguimos y las fuentes usadas para la construcción de las series anuales de consumo de los distintos cultivos forrajeros.

6.4.1.1 Granos y semillas oleaginosas

Las series del consumo de granos (sorgo, avena, cebada y trigo) y semillas oleaginosas provienen del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA 2017).

Los datos de maíz almacenados por USDA incluyen aparentemente datos de maíz cultivado para autoconsumo humano para algunos años. Por lo que optamos por estimar una serie temporal propia de datos de maíz en grano para consumo animal, ensamblando datos de los siguientes intervalos parciales:

1961-1984: se estima que entre 1961 y 1980 en promedio el 13% del total de maíz consumido fue para alimentación animal (CIMMYT 1981). Extendimos esta cifra hasta 1984.

1985-1989: entre 1985 y 1987 el promedio del total de maíz en grano consumido en alimentación animal fue del 9% (CIMMYT 1990). De nuevo, extendimos este valor hasta 1989.

1990-2006: en primer lugar, eliminamos los datos de consumo de maíz de la serie temporal del total de granos forrajeros consumidos de acuerdo al Departamento

de Agricultura de Estados Unidos (USDA 2017). Obtuvimos (1) la cantidad total de granos forrajeros excepto el maíz. En segundo lugar, dado que los datos de la SAGARPA (2014) sobre el uso de granos para alimentación del ganado durante este periodo incluyeron maíz, sustrajimos (1) de dicha serie para obtener el valor del maíz grano destinado a consumo animal.

2007-2013: Usamos los datos de la Asociación Nacional de Fabricantes de Alimentos para Consumo Animal (ANFACA 2017).

6.4.1.2 Forrajes en verde, seco y heno

Incluye alfalfa, avena y cebada. La estimación del consumo de alfalfa es el resultado de la producción nacional (1961-1979: SPP 1980; 1980-2013: SAGARPA 2016), más las importaciones, menos las exportaciones (FAO 2017). Para avena y cebada, obtuvimos los datos de producción de 1970 en fuentes oficiales (SIC, 1975) y los valores anuales de 1980 a 2013 (SAGARPA 2016), estimando los valores entre 1970 y 1980 con base en la media anual de la tasa de crecimiento calculada para ese periodo. Dado que el comercio exterior de avena y cebada no es significativo decidimos equiparar producción y consumo respecto a esos dos cultivos.

6.4.1.3 Pastos y praderas cultivados

Las cantidades de pastos cultivados resultan inciertas, pues algunos de ellos podrían pertenecer a áreas de pastoreo extensivo. Sin embargo, los registros oficiales mexicanos clasifican los pastos cultivados como una categoría específica de cultivo, basados en la misma metodología de cálculo que para el resto de los cultivos forrajeros. Consideramos producción equivalente a consumo. Para el periodo 1960-1979, utilizamos los datos de superficie de pastos cultivados de Barkin (1981) y estimamos la producción multiplicando por la productividad promedio entre los años 1980-2013. Finalmente, los datos de producción entre 1980 y 2013 proceden de SAGARPA (2016).

6.4.2 Producción nacional de cultivos forrajeros

6.4.2.1 Granos y semillas oleaginosas

Elaboramos una serie temporal integrando la producción anual de los cultivos de sorgo (usamos los datos de USDA 2017), frijol de soya (usamos los datos FAO 2017) y maíz (estimación propia). Para el maíz, ensamblamos datos de los siguientes intervalos parciales:

1961-1988: De acuerdo con los Censos Agrícolas y Ganaderos el 76% del consumo de maíz forrajero en 1960 (SIC 1965) y 52% en 1970 (SIC 1975) provino de producción nacional. Asumimos que estos dos porcentajes pueden extenderse para el periodo 1961-1969 y el periodo 1970-1988, respectivamente. Por lo tanto, aplicamos estos porcentajes a nuestra estimación del consumo de maíz para alimentación de ganado.

1989-2006: Sustrajimos los valores de importación de maíz (USDA 2016) destinadas fundamentalmente a consumo animal, de nuestras estimaciones de consumo.

2007-2013: Obtuvimos la información anual de los datos de la ANFACA (2017).

6.4.2.2 Forrajes en verde, seco y heno

Alfalfa (SAGARPA 2016), y forrajes de cebada y avena (equiparamos producción y consumo en el caso de los dos últimos).

6.4.2.3 Pastos y praderas cultivados

Consideramos la producción equivalente al consumo.

6.4.3 Importaciones y exportaciones de cultivos forrajeros

Calculamos las importaciones de cultivos forrajeros como consumo total menos producción total de cada uno de los cultivos (y sumamos esos subtotales posteriormente). Las exportaciones mexicanas de cultivos forrajeros son casi

inexistentes (FAO 2017; USDA 2017). No las integramos, además, porque las estadísticas no están disponibles para todos los productos y subproductos para consumo animal.

6.5 Superficie de tierra cosechada de cultivos forrajeros

6.5.1 Granos y semillas oleaginosas

Obtuvimos los datos sobre la superficie de tierra agrícola destinada al cultivo del sorgo y soya (hectáreas) entre 1961 y 2013 de FAO (2017). Para el maíz, calculamos su área de cultivo usando los valores estimados de la producción de maíz forrajero y de las series anuales de productividad media nacional de maíz (producción/área de cultivo) (USDA 2017).

6.5.2 Forrajes en verde, seco y heno

Respecto a la superficie de tierra agrícola destinada al cultivo de alfalfa utilizamos los datos disponibles para dos periodos (1961-1969: SPP 1981; 1980-2013: SAGARPA 2016), mientras que para el periodo 1970-1980 calculamos los valores basándonos en la media anual de la tasa de crecimiento calculada para ese periodo.

Para avena y cebada, obtuvimos los datos de superficie cultivada de 1970 en fuentes oficiales (SIC, 1975) y los valores anuales de 1980 a 2013 (SAGARPA 2016). Posteriormente estimamos los valores entre 1970 y 1980 con base en la media anual de la tasa de crecimiento calculada para ese periodo.

6.5.3 Pastos y praderas cultivados

Para el periodo 1960-1979, utilizamos los datos de Barkin (1981); para el periodo 1980-2013 los datos proceden de SAGARPA (2016).

6.6 Superficie de tierra agrícola donde se cultivan los forrajes importados

Se trata de la superficie de tierra agrícola vinculada a los cultivos forrajeros importados. Esto es, la superficie de tierra agrícola que se necesitaría para producir los cultivos importados en una fecha determinada, dada la productividad promedio en esa fecha de dichos cultivos en México. Para calcular esta superficie dividimos la cantidad importada de productos forrajeros entre la productividad promedio anual de los tres principales granos forrajeros (maíz, sorgo y soya), que representan el 82% de la cantidad de forrajes importados. Los rendimientos medios anuales los estimamos dividiendo el volumen de producción total (toneladas) entre la superficie agrícola cosechada total (ha) en México por año para cada uno de los tres granos.

6.7 Área cosechada total

En primer lugar, elaboramos la serie anual de superficie agrícola cosechada total entre 1950 y 2013; para el periodo 1950-1961 basados en Barkin (1981) y entre 1961-2013, basados en SAGARPA (2016) y FAO (2017).

Posteriormente construimos las series temporales de superficie cosechada de los principales cultivos forrajeros (ver apartado previo) y de su conjunción obtuvimos la serie de superficie cosechada destinada a consumo animal. La superficie cosechada destinada al consumo humano directo se obtuvo de la diferencia entre la superficie cosechada total y la destinada a consumo animal.

6.8 Análisis a nivel estatal (1980-2017)

A partir de 1980 existe información oficial sobre producción agropecuaria a nivel estatal de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER 2019). Con base en esa fuente construimos las series anuales de 1) huevo, 2) carne de todas las especies (bovino, cerdo, pollo, chivo y borrego), 3) superficie y producción de los cultivos forrajeros (Tabla IV), y 4) superficie cultivada total.

En primer lugar, exploramos a nivel nacional y para cada uno de los estados el crecimiento relativo de la producción de carne y huevo y de la superficie total de forraje cultivado respecto a su valor en 1980.

Tabla IV. Cultivos considerados como forrajeros a partir de SADER (2019).

1) Granos y oleaginosas	2) Forrajes: en verde (v); seco (s) y henificados (h)	3) Pastos y praderas cultivadas
Alpiste	Alfalfa (v y h)	Pastos y praderas: achicalado y seco
Canola	Avena (v, s, y h)	
Cártamo en verde	Caña de azúcar	
Girasol	Cebada (v, s, y h)	
Leucaena	Centeno (v, s, y h)	
Maíz grano	Clyptoria	
Mijo	Coquia	
Sorgo grano	Ebo (janamargo o veza)	
Soya	Col (repollo)	
	Frijol	
	Garbanzo	
	Maguey	
	Maíz (planta) (v, s, y h)	
	Mostaza forrajera	
	Nopal	
	Nabo	
	Remolacha	
	Sorgo (planta) (v, s, y h)	
	Trigo (v, s, y h)	
	Trébol	
	Triticale (v, s, y h)	
	Zempoalxochitl	

En segundo lugar, analizamos la asociación entre la superficie estatal destinada a forrajes cultivados y la producción de carne y huevo, y su cambio a lo largo del tiempo. Como inicio del periodo consideramos el valor promedio de los tres primeros años (1980 a 1982) y como final, el de los tres últimos años (2015 a 2017). Esto lo hicimos para evitar que, al elegir solo el valor de inicio y final del periodo, por azar fuera un año de valores atípicamente altos o bajos, y pudiera sesgar la estimación del cambio. Para evitar otro efecto distorsionador extrajimos de la modelación de la relación los estados con valores extremos en superficie de forraje

o en producción de proteína animal. Consideramos como valores extremos aquellos superiores al valor de la suma del cuartil superior más tres veces la distancia intercuartil (Q_s+3dQ). El cuartil superior es el valor por encima del cual está el 25% de los datos y la distancia inter-cuartil es la diferencia entre el cuartil superior y el cuartil inferior (valor por encima del cual está el 75% de los datos).

Finalmente, para explorar la relación de la dinámica de la superficie de forrajes cultivados sobre la variación de la superficie cultivada total, analizamos la correlación entre el cambio de ambas variables por cada década desde 1980.

6.9. Riesgos ambientales

Se realizó una revisión de las estadísticas disponibles sobre información relacionada con los posibles efectos ambientales de la intensificación de la producción ganadera (FAO 2017, USDA 2016, INEGI 2019). La información es casi inexistente, pero localizamos algunas series de datos relacionadas con la intensificación de la agricultura en FAO (2017) para el área equipada para riego (1961 a 2013) y para pesticidas (1990 a 2013). La serie temporal de uso total de fertilizantes nitrogenados incluye los datos disponibles en la FAO (2017) para los años 1961-2001. Estimamos datos para los años 2002 a 2013 basados en Tilman et al. (2001), por medio de una regla de tres simple directa.

7. RESULTADOS

7.1 Población humana y consumo de alimentos de origen animal (AOA)

En los primeros 60 años del siglo 20, la población de México aumentó de 11.2 a 31.2 millones de habitantes (128%) a una tasa de crecimiento media anual de 1.7%. La población urbana aumentó 73%, a una tasa promedio de 2.4% por año. Sin embargo, durante las siguientes cinco décadas (1961 a 2013), la población aceleró su crecimiento de 32.4 a 118.1 millones de habitantes (265%) a una tasa anual de 2.5%. Mientras el aumento de la población urbana fue aún mayor (483%) con una tasa anual de 3.4% (Fig. 2). En el mismo período, el consumo agregado de todo tipo de carne y huevo se multiplicó por 10, de 1 a 10 millones de toneladas, a una tasa promedio anual de 4.4% (Fig. 3).

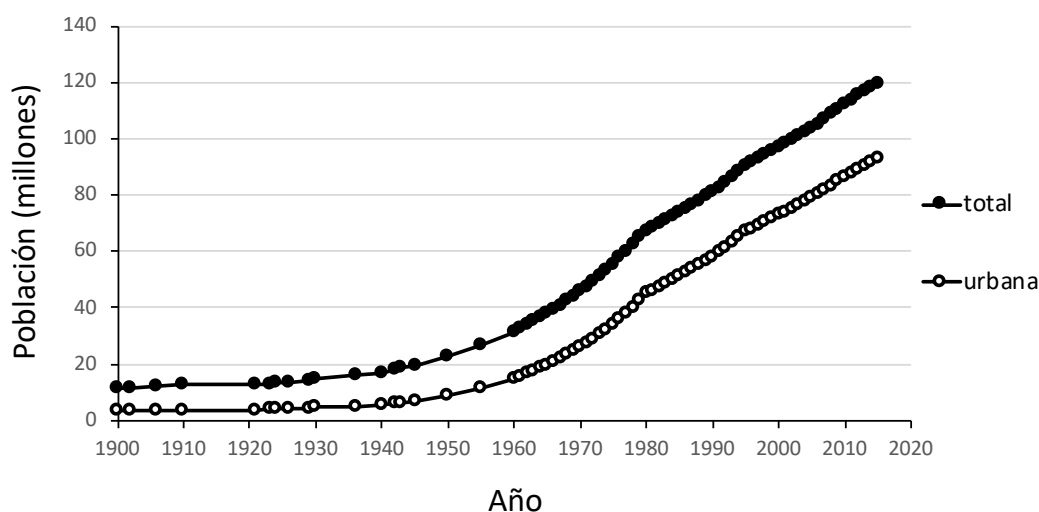


Figura 2. Crecimiento de la población total y urbana en México entre 1900 y 2015.

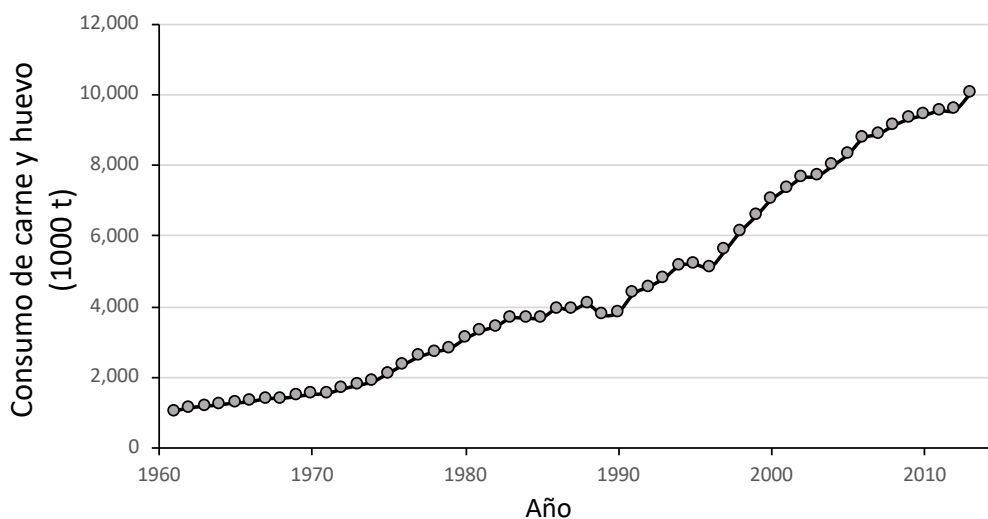


Figura 3. Consumo agregado de carne y huevo en México entre 1961 y 2013. Incluye carne de bovino, aves de corral y cerdo, así como huevos.

En el periodo 1961-2013 se produjo un cambio muy importante en la dieta de la población mexicana. Observamos que la ingesta promedio de energía en el país aumentó 32% en ese período, de 2279 a 3023 kcal·persona⁻¹·día⁻¹, y la proporción de la misma correspondiente a AOA aumentó de 11.6 a 19.3%. Del mismo modo, el suministro total de proteínas aumentó 34%, de 61 a 82 g·capita⁻¹·día⁻¹, y la participación animal en el suministro de proteínas aumentó de 24% a 43% de la dieta total (Fig. 4). De hecho, el consumo per cápita de los cinco tipos principales de alimento de origen animal combinados (carne de res, cerdo y aves de corral; huevos y leche) aumentó 73% entre 1961 y 2013, de 104.8 a 181.4 kg año⁻¹. México ascendió en el *ranking* mundial de consumo de carne y huevo, pasando del lugar 65 de 154 países en 1961(33 kg·percápita⁻¹·año⁻¹), al lugar 54 de 175 países en 2103 (85.9 kg·percápita⁻¹·año⁻¹) (FAO 2017) (Fig. 5).

El incremento principal se produjo en el consumo de carne de pollo (658%), que se multiplicó de 4.2 a 31.6 kg año⁻¹, seguido de los huevos (396%), de 4.4 a 21.6 kg año⁻¹, la carne de res (53%), de 10.5 a 16.1 kg año⁻¹, y la carne de cerdo (23%), de 13 a 16 kg año⁻¹ (FAO 2017) (Fig. 6). Finalmente, el consumo de leche per cápita aumentó en 31%, de 71.8 a 94.3 L año⁻¹.

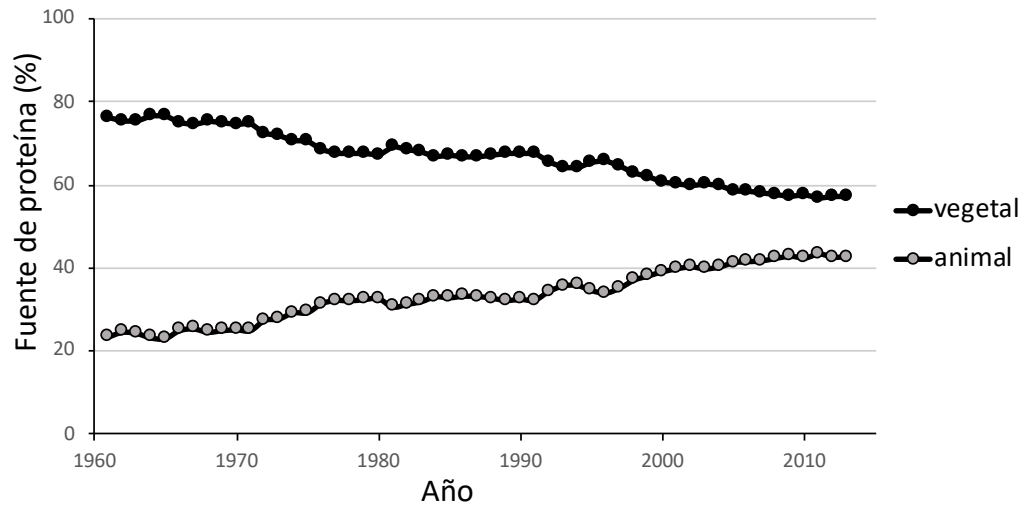


Figura 4. Consumo de proteína por fuente animal y vegetal en México entre 1961 y 2013. Porcentaje del total de proteína consumida per cápita por tipo de origen.

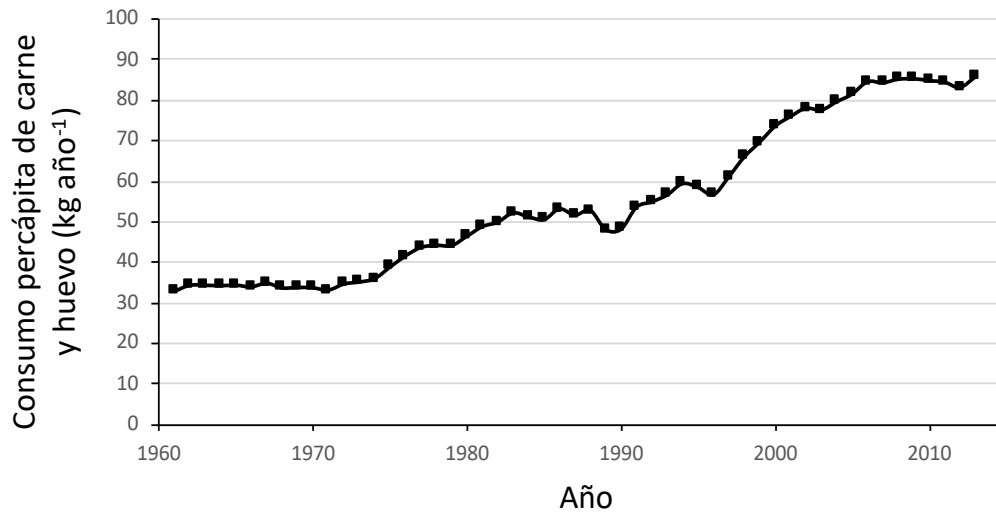


Figura 5. Consumo per cápita agregado de carne y huevo en México entre 1961 y 2013.

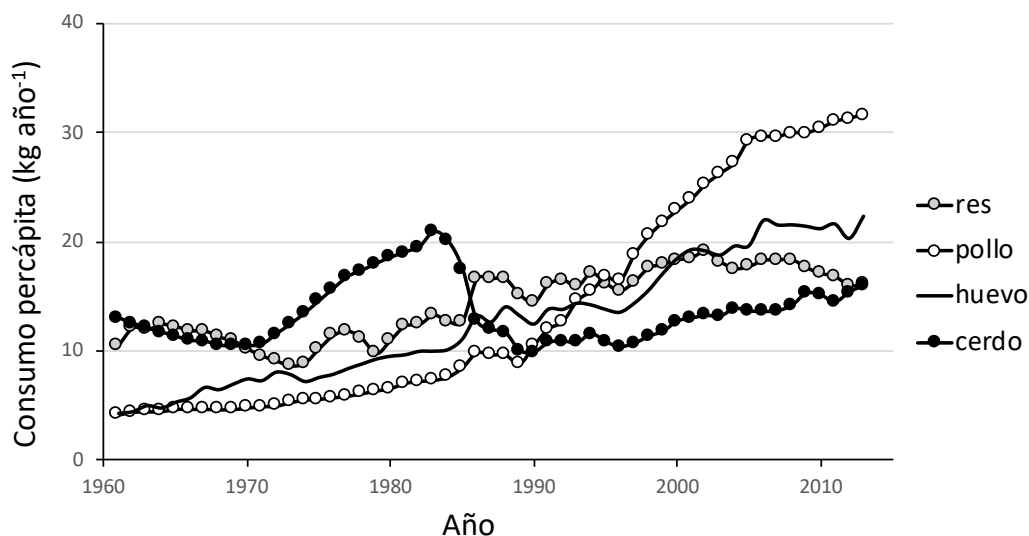


Figura 6. Consumo per cápita de los cuatro tipos principales de alimento de origen animal en México entre 1961 y 2013.

7.2 Producción nacional e importaciones de AOA

Entre 1961 y 2013, la producción nacional de carne y huevo creció 790% (de una a 8.5 millones de toneladas). Es decir, pasó de 33 a 72.5 kg·percápita·1·año⁻¹.

La producción nacional de carne de pollo aumentó 2008% (de 0.14 a 2.8 millones de toneladas), mientras la de huevos creció 1684% (de 141 a 2.5 millones de toneladas), carne de res 385%, 0.37 a 1.8 millones de toneladas, leche 371% (de 2.3 a 11 millones de toneladas), y carne de cerdo 204%, de 0.42 a 1.3 millones de toneladas (Fig. 7).

La producción y el consumo de aves de corral (incluidos los huevos) aumentaron mucho más rápido que la población. Para la carne de res, el aumento fue menos brusco, pero aún más rápido que el crecimiento de la población, y la carne de cerdo aumentó aproximadamente a la misma tasa que la población (Tabla V).

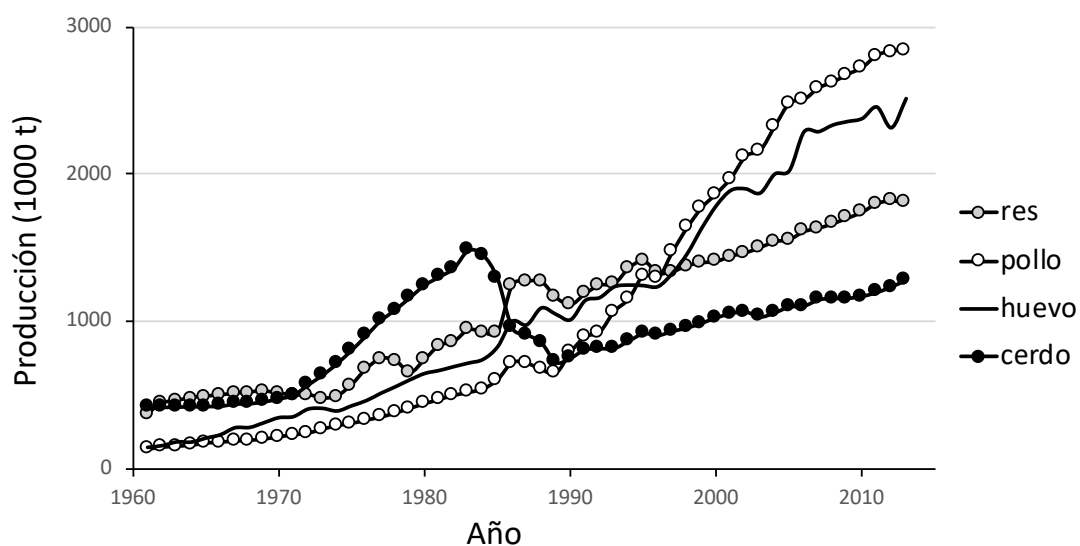


Figura 7. Producción nacional de carne (res, pollo y cerdo) y huevo en México entre 1961 y 2013.

Tabla V. Tasas medias de crecimiento anual (% valor $\pm \sigma$) en alimentos de origen animal (carne + huevos) durante el período 1961–2013 en México.

	Res	Pollo	Cerdo	Huevo
Producción	3.10 \pm 0.11	6.45 \pm 0.08	1.86 \pm 0.24	5.43 \pm 0.13
Consumo	3.65 \pm 0.13	7.00 \pm 0.09	2.56 \pm 0.21	5.46 \pm 0.13
Consumo per cápita	1.27 \pm 0.11	4.61 \pm 0.12	0.18 \pm 0.18	3.07 \pm 0.07

La producción nacional dejó de ser suficiente para satisfacer la demanda y desde finales de la década de 1980 las importaciones de carne (todos los tipos) también aumentaron, representando en 2013, el 24% del total de carne consumida. En ese año, la proporción de producción nacional en el consumo total representó el 77% de pollo, 89% de res y el 58% de cerdo (Fig. 8).

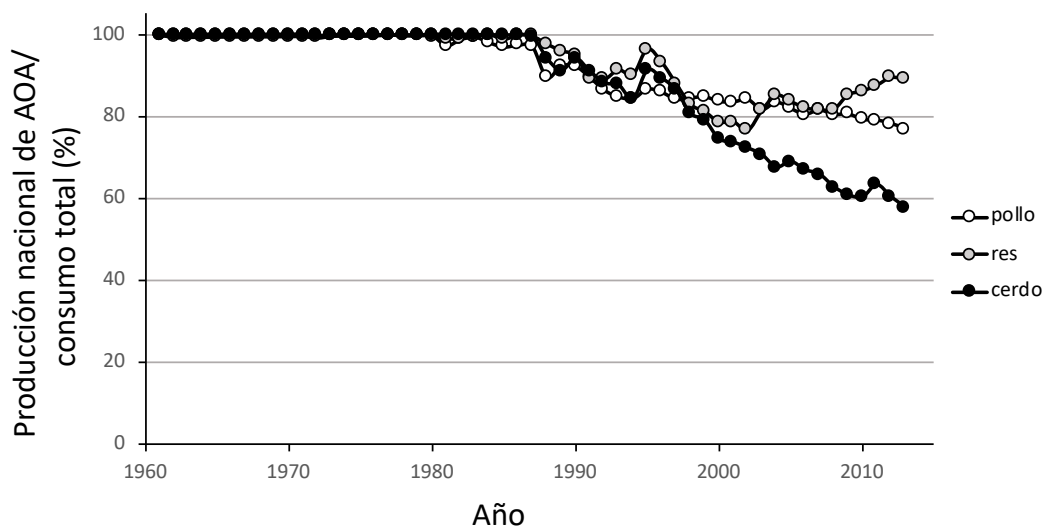


Figura 8. Proporción del consumo de pollo, res, y cerdo que se produjo en México entre 1961 y 2013.

Las importaciones de carne de res aumentaron hasta 2001 y, desde entonces, han disminuido continuamente; las de aves de corral se triplicaron entre 1990 y 2013; y las de carne de cerdo aumentaron 700% (Fig. 9). Durante el periodo de estudio, los huevos y la leche fresca consumidos en México fueron producidos en el país. En contraste, las exportaciones mexicanas de AOA han sido muy reducidas, inferiores al 8% de la producción de res entre 1960-70 y 2005-2012, y un aumento de la de cerdo, a partir de 1994, hasta el 10% de la producción en 2013.

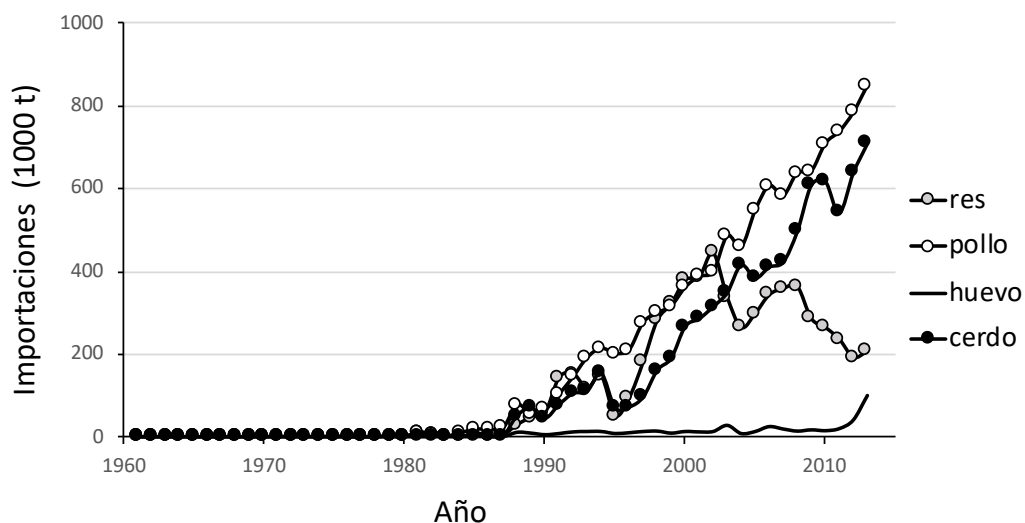


Figura 9. Importaciones mexicanas de carne (res, pollo y cerdo) entre 1961 y 2013.

7.3 Consumo, producción e importaciones de productos forrajeros

El consumo de productos para alimentar a los animales aumentó 2157% entre 1961 y 2013, de 5.3 a 119.3 millones de toneladas, a una tasa media anual del 6%. El grueso del consumo está integrado por biomasa fresca de forrajes cultivados, que se producen en el país casi en su totalidad. Los pastos cultivados aumentaron de 0.02 a 49.3 millones de toneladas y los forrajes (principalmente alfalfa) de 4.2 a 42.8 millones de toneladas, a tasas medias anuales de crecimiento de 14.7% y 4.5%, respectivamente (Fig. 10).

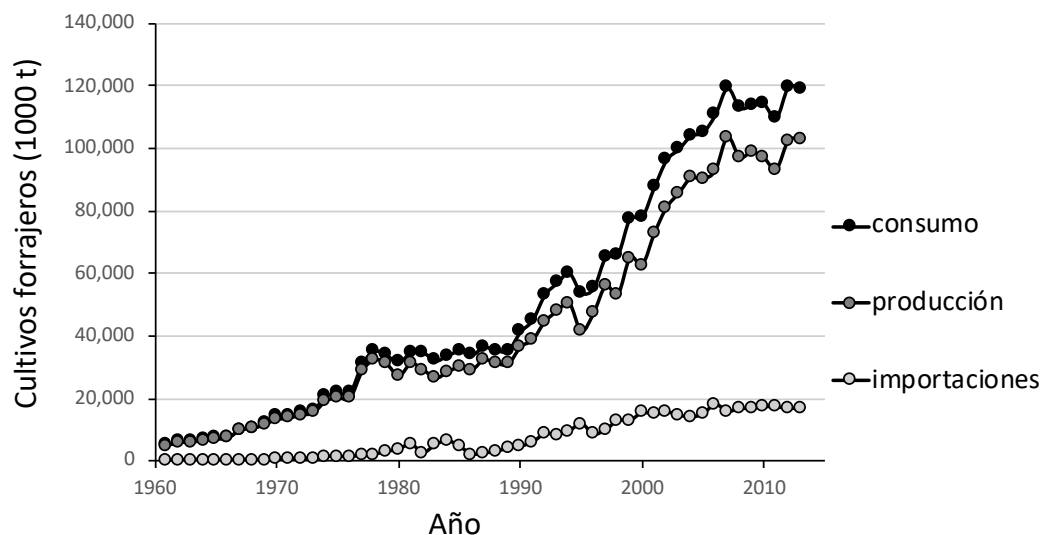


Figura 10. Consumo total, producción nacional e importaciones de cultivos forrajeros en México entre 1961 y 2013.

El consumo de granos forrajeros y semillas oleaginosas aumentó 2533% en el periodo de estudio, de 1 a 27 millones de toneladas, a una tasa media anual del 6.3%. Esta categoría de forrajes se produjo casi en su totalidad en el país durante la década de 1960, pero las importaciones comenzaron a aumentar rápidamente desde la década de 1970. En los años ochenta, las importaciones de granos y oleaginosas representaba ya el 49% del consumo total de esta categoría de forrajes y desde 1992 la proporción de las importaciones se ha establecido en torno al 60% de su consumo total en el país.

En 2013, el 82% de las importaciones totales de alimento para ganado se componía de tres productos: maíz (50%), soya (29%) y sorgo (11%) (Fig. 11). El consumo de estos tres cultivos aumentó constantemente desde 1960 a una tasa promedio anual de 7%. Este aumento ha sido respaldado principalmente por las importaciones que crecieron a una tasa del 9.2%, el doble de rápido que el aumento de la producción nacional que fue del 4.2% durante el mismo período.

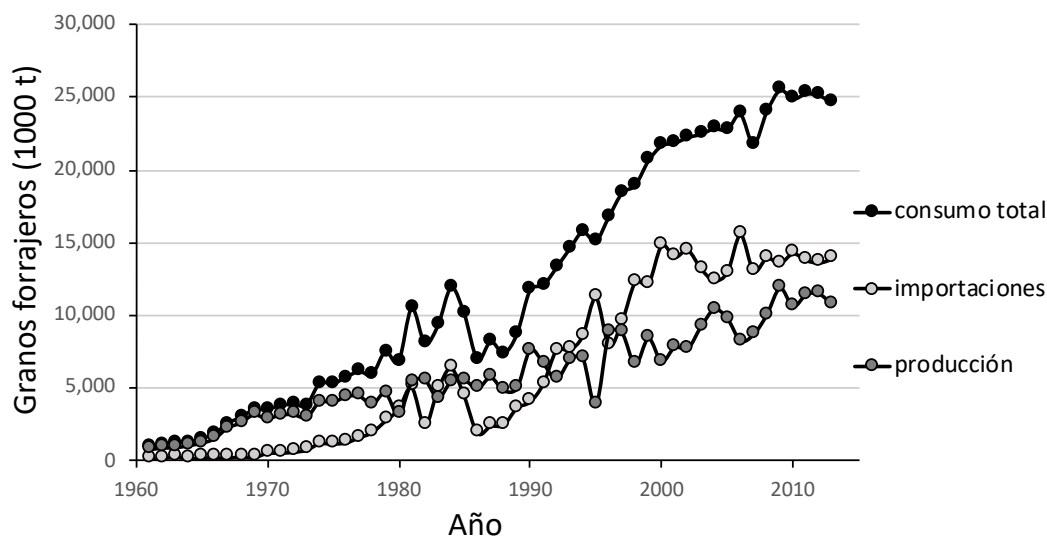


Figura 11. Consumo, producción e importaciones de granos forrajeros (maíz, sorgo y soya) en México entre 1961 y 2013.

7.4 Uso de suelo agrícola

El cultivo de alimentos de consumo humano directo se expandió rápidamente a mediados del siglo 20, de 8.2 millones de ha en 1950 a 14.6 millones de ha en 1966 (77%). Sin embargo, el desarrollo de la intensificación tecnológica en la década de 1960 detuvo la expansión del área cosechada de cultivos alimenticios, la cual se estabilizó y disminuyó gradualmente hasta 12.2 millones de ha en 2013. Los cultivos forrajeros, por el contrario, aumentaron a una tasa media de 3.9%, a partir de una magnitud minúscula antes de 1960, hasta 5.8 millones de ha en 2013, que representaron el 36% de la superficie de tierra agrícola cosechada en ese año (Fig. 12).

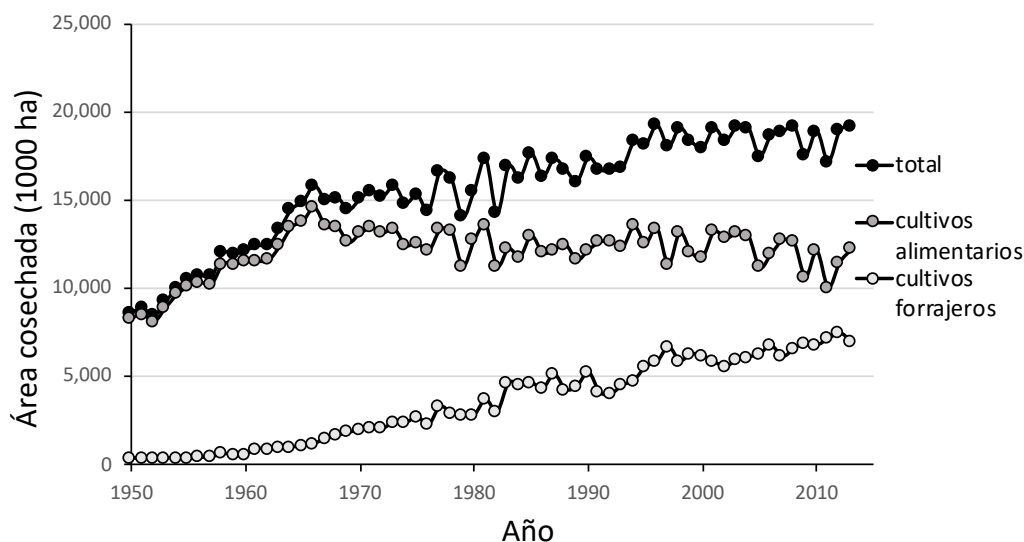


Figura 12. Superficie de tierra cosechada en México entre 1961 y 2013, dedicada a cultivos de consumo humano directo y a cultivos de consumo animal.

Si suponemos que la reducción de alrededor de 2.4 millones de hectáreas de cultivos de consumo humano directo entre 1966 y 2013 cambió en su totalidad a la producción de cultivos forrajeros, aún quedarían 3.4 millones de hectáreas de crecimiento neto de los cultivos forrajeros, produciendo la expansión de la superficie de tierra agrícola.

El carácter de cultivo agrícola de la categoría de pastos cultivados puede estar a discusión. Si de manera conservadora excluimos esta categoría, que pasó de 1 a 2.6 millones de hectáreas en el periodo de estudio, la superficie de cultivo forrajero representaría el 23% de la superficie cosechada total en 2013.

Observamos entonces que los cultivos forrajeros han sido responsables de la expansión de la superficie sembrada total (frontera agrícola). El aumento de la superficie sembrada total desde los años 90 se vincula a la expansión de la superficie de los cultivos forrajeros, notablemente entre 1993 y 1997. A partir de entonces y hasta el presente, observamos un comportamiento de relativa estabilidad en la dinámica de la superficie sembrada total (Fig. 13). Sin embargo, la proporción en que ha aumentado la superficie sembrada corresponde de forma creciente al crecimiento de la superficie sembrada de cultivos forrajeros,

notablemente desde 1993 y hasta 2017 cuando registró 106% (el 6% extra corresponde a la disminución de la superficie de cultivos de consumo humano directo) (Fig.14).

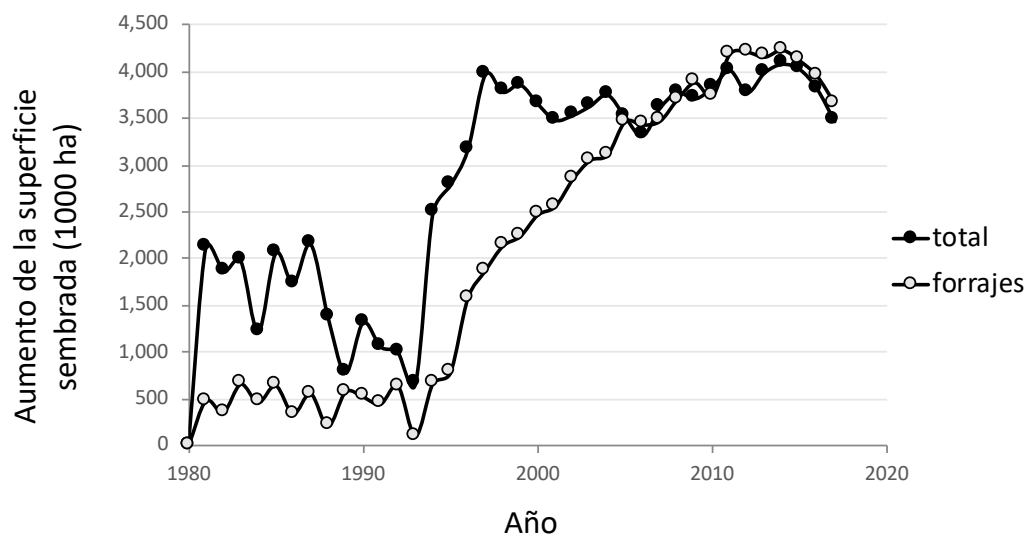


Figura 13. Incremento anual de la superficie sembrada total y de forrajes cultivados entre 1980 y 2017 a nivel nacional.

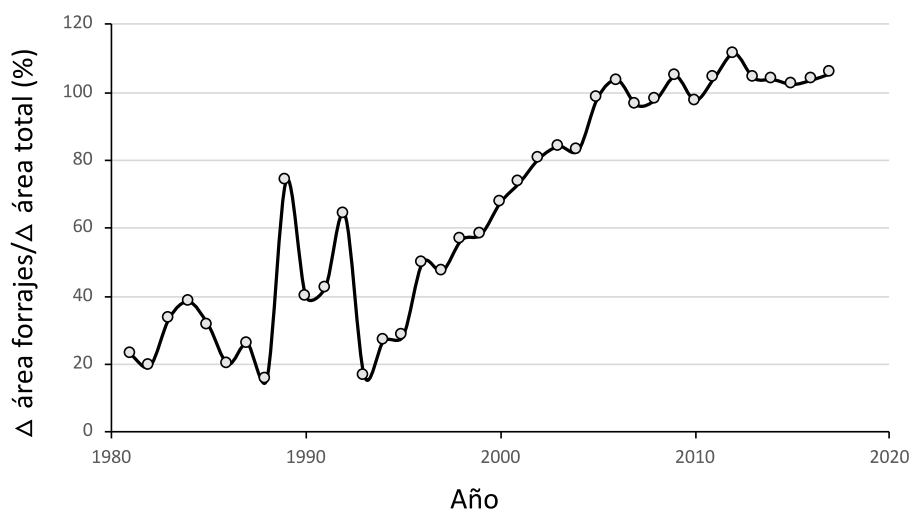


Figura 14. Cambio de la superficie total de forrajes cultivados como porcentaje del cambio de la superficie sembrada total. Cambios anuales entre 1980 y 2017. Año base=1980.

Con relación a la superficie de tierra agrícola donde se cultivan los forrajes importados, principalmente Estados Unidos, estimamos que aumentó en 2030% entre 1961 y 2013, de 0.2 a 5.1 millones de ha. Observamos un patrón de crecimiento constante desde en 1970, con variaciones pronunciadas en las décadas de 1980 y 1990. Después del año 2000 vemos una aparente estabilización en torno a 5 millones de ha, que representa 27% de la superficie total que se cosechó en México ese año (Fig. 15). Esto equivale al 115% de la superficie de tierra cosechada de cultivos forrajeros en México en 2013, excluyendo pastos y praderas cultivados, ya que estos no se importan.

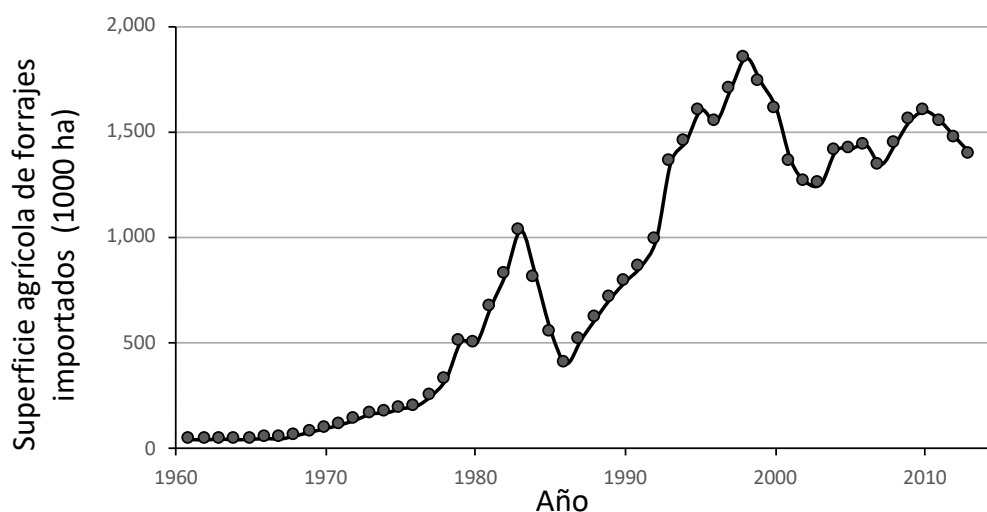


Figura 15. Estimación de la superficie de cultivo de los forrajes importados por México entre 1961 y 2013.

7.5 Rendimientos agrícolas

Los rendimientos agrícolas aumentaron entre 1961 y 2013. El rendimiento medio de dos de los tres granos forrajeros principales aumentó sostenidamente entre 1961 y 2013: maíz (0.9 a 3.2 toneladas ha^{-1}) y sorgo (1.8 a 3.8 toneladas ha^{-1}). El rendimiento del tercer grano forrajero más relevante, la soya, disminuyó de 2.0 a 1.5 toneladas ha^{-1} . El rendimiento de la alfalfa, el forraje principal para el ganado

lechero, aumentó de 28.9 a 80.7 toneladas ha⁻¹ de forraje fresco (equivalente a aproximadamente 8 a 23 toneladas ha⁻¹ de biomasa seca; Rojas-García et al. 2017).

7.6 Maíz

Entre 1961 y 2013, el consumo total de maíz aumentó 400% (de 5.4 a 27 millones de toneladas), sin embargo, la demanda de maíz para alimentación animal (principalmente maíz amarillo) aumentó 1700% (de 0.7 a 12.8 millones de toneladas) (Fig. 16). El consumo animal de maíz se disparó desde que México se abrió al comercio internacional a fines de la década de 1980, y ha dependido principalmente de las importaciones (Fig. 17). Mientras que a principios de la década de 1990 el maíz importado constituía cerca de 20% de todo el maíz utilizado para la alimentación animal, a fines de la primera década de los años 2000, las importaciones representaban aproximadamente el 70% del maíz consumido por los ganados. Finalmente, la producción nacional total de maíz aumentó de 6.2 a 22.7 millones de toneladas (363%) entre 1961 y 2013, pero la cantidad dedicada a alimentar a los animales aumentó a un ritmo mucho más rápido, de 0.54 a 4.3 millones de toneladas (796%).

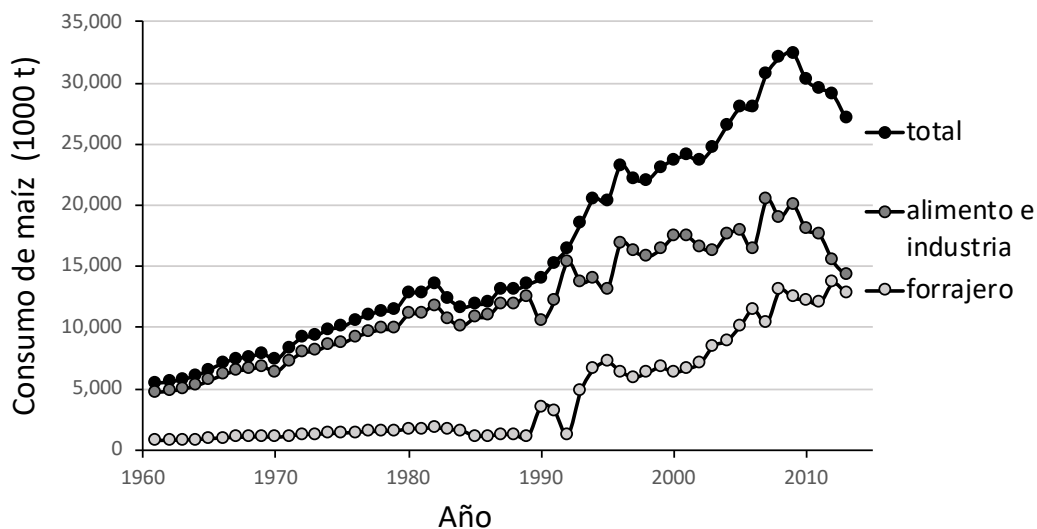


Figura 16. Consumo de maíz en México de acuerdo al destino de uso entre 1961 y 2013.

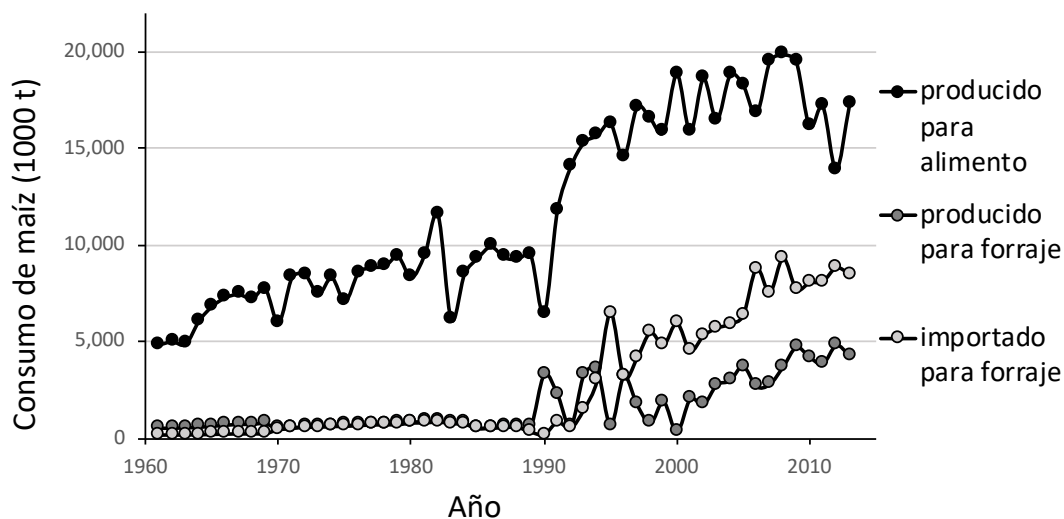


Figura 17. Producción e importación de maíz en México de acuerdo a tipo de consumo entre 1961 y 2013

7.7 Relación entre la producción animal y la superficie agrícola en México

7.7.1 A nivel del país

La producción de alimentos de origen animal y la superficie cultivada de forrajes a escala del país estuvieron acopladas entre 1961 y 2012. En las primeras dos décadas ambas variables crecieron notablemente (242% y 292%, respectivamente). La producción de AOA creció a una tasa anual (6.2%) inferior a la tasa de superficie de forrajes (6.8%). En la década siguiente, ambas variables se mantuvieron constantes: la producción de AOA en torno a 4 millones de toneladas hasta 1990 y la superficie de forrajes en torno a 3.8 millones de ha hasta 1993. A partir de estas fechas, ambas variables crecieron de forma constante a tasas similares (cerca de 2.7% anual), hasta 2012 en que la superficie de forraje se estabiliza en 6.7 millones de ha y posteriormente decrece ligeramente. Por su parte, la producción de AOA siguió creciendo a la misma tasa hasta sumar 9.5 millones de toneladas en 2017 (Fig. 18).

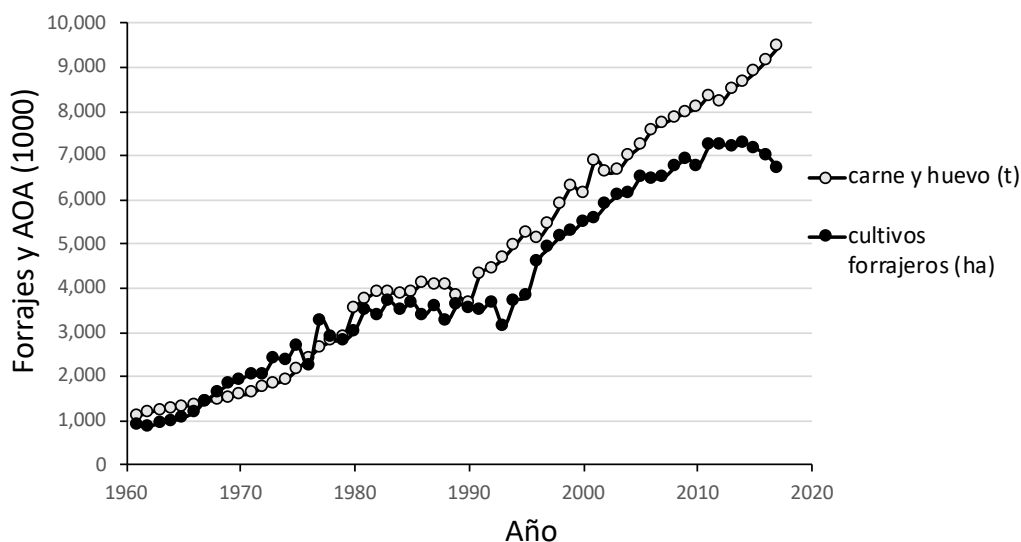


Figura 18. Dinámica temporal de la producción animal (carne y huevo) y la superficie de forraje cultivado en México entre 1961 y 2017. Círculos grises: producción de carne y huevo (toneladas); círculos negros: superficie de cultivos forrajeros (hectáreas).

La intensificación de la producción de AOA, medida como la superficie de forraje cultivado por unidad de producto animal obtenido, registró valores cercanos a 0.8 ha t⁻¹ entre 1961 y 1965, posteriormente aumentó considerablemente hasta 1973 (1.31 ha t⁻¹) para descender después hasta 0.86 ha t⁻¹ en 1980, valor en torno al cual se ha mantenido relativamente constante (Fig.19).

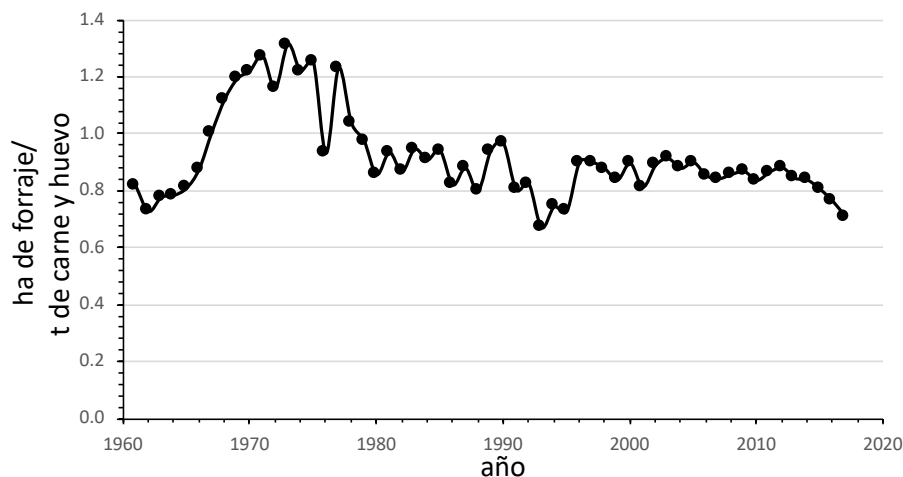


Figura 19. Intensificación productiva expresada en hectáreas (ha) de cultivos forrajeros por cada tonelada (t) de carne y huevo producida en México.

7.7.2 A nivel de los estados

A escala de los estados de México el crecimiento relativo de la producción de AOA y de la superficie de cultivos forrajeros entre 1980 y 2017 muestra tres tipos de asociación:

- La producción de AOA crece a una tasa mayor que la superficie sembrada de forrajes en nueve estados (Fig. 20).
- La producción de AOA crece menos que la superficie sembrada de forrajes en 19 estados (Fig. 21).
- La producción de AOA crece de manera equivalente a la superficie sembrada de forrajes en cuatro estados (Fig. 22).

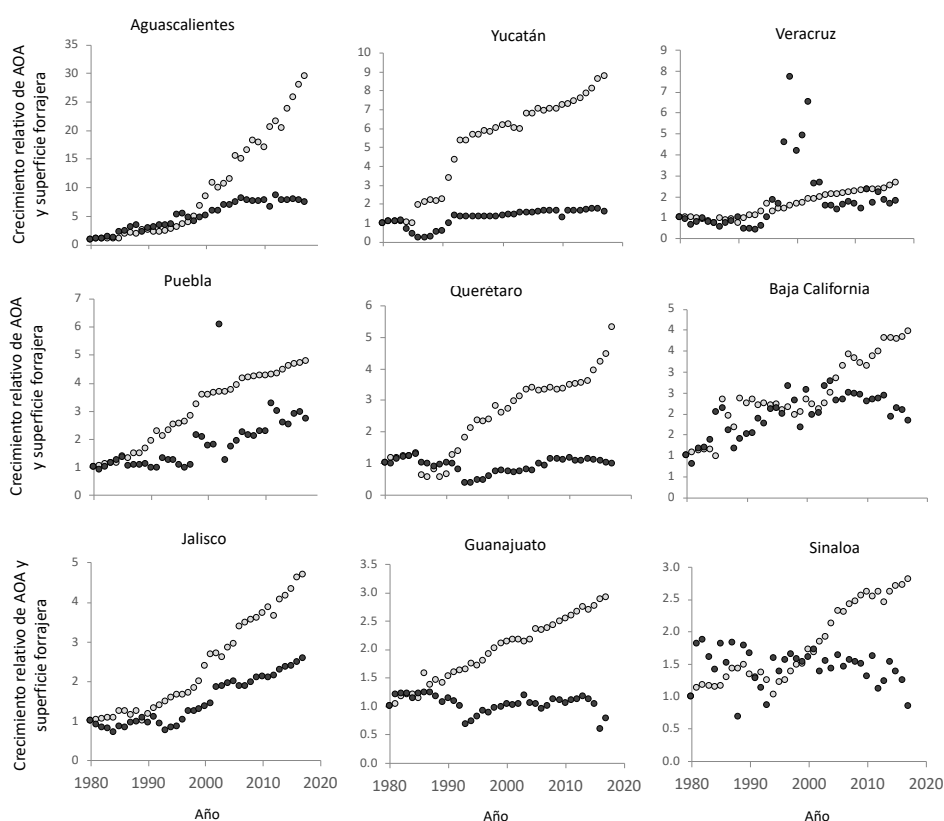


Figura 20. Crecimiento relativo de la producción de carne y huevo (círculos blancos) y de la superficie de forraje cultivado (círculos negros) respecto a su valor de 1980. Estados con crecimiento relativo de la producción de AOA superior al de la superficie de forrajes cultivados. Nótese que el eje Y representa intervalos de diferente tamaño.

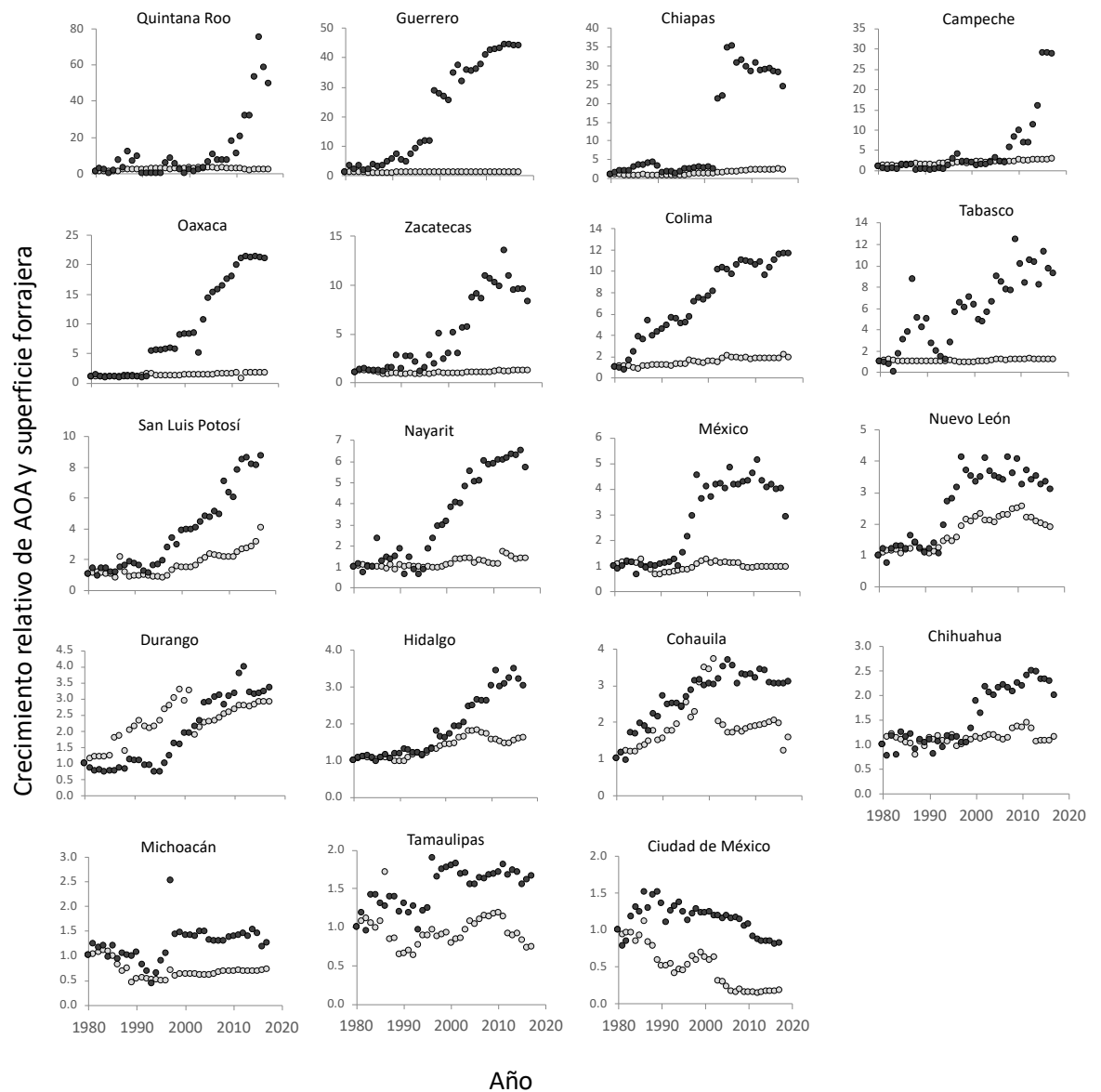


Figura 21. Crecimiento relativo de la producción de carne y huevo (círculos blancos) y de la superficie de forraje cultivado (círculos negros) respecto a su valor de 1980. Estados con crecimiento relativo de la producción de AOA inferior al de la superficie de forrajes cultivados. Nótese que el eje Y representa intervalos de diferente tamaño.

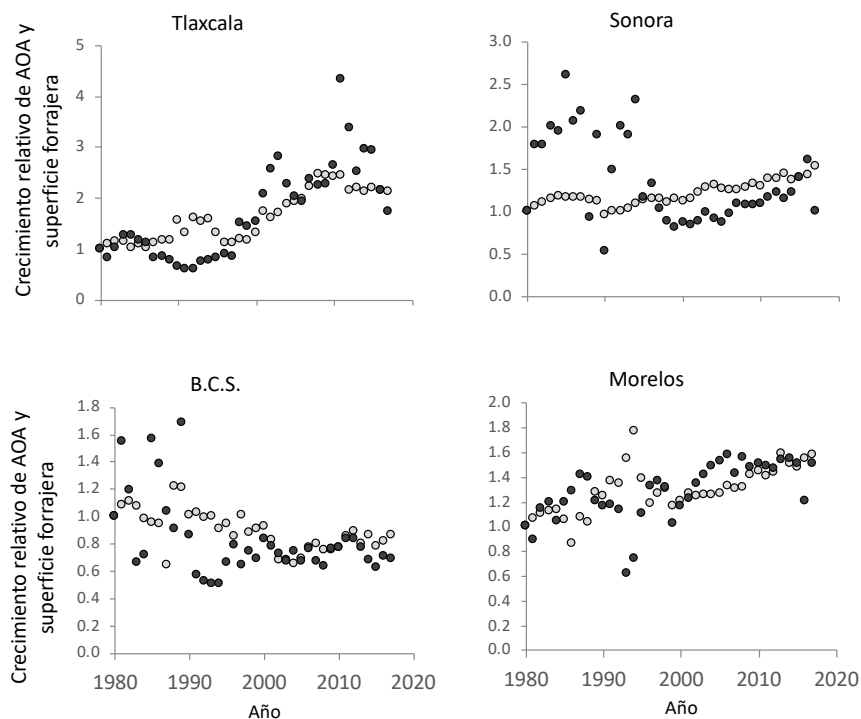


Figura 22. Crecimiento relativo de la producción de carne y huevo (círculos blancos) y de la superficie de forraje cultivado (círculos negros) respecto a su valor de 1980. Estados con crecimiento relativo de la producción de AOA similar al de la superficie de forrajes cultivados. Nótese que el eje Y representa intervalos de diferente tamaño (B.C.S.=Baja California Sur).

Respecto a la correlación de la producción de AOA y la superficie sembrada de forrajes en el conjunto de los estados encontramos que el modelo que mejor describe el cambio de la relación a lo largo del tiempo es el potencial ($Y=aX^b$). En ambos tiempos la intensidad de la correlación es semejante, alrededor de 40% de la variación de la superficie de forraje cultivado en los estados está correlacionada con la variación de la producción de AOA en los mismos. El modelo potencial cambia durante el periodo de estudio, mientras al principio el valor del exponente es próximo a uno (0.93), es decir, se aproxima a un modelo lineal, al final del periodo el exponente es ya 0.6, claramente distinto de uno. Respecto a los estados con valores extremos, al inicio del periodo solo el estado de Jalisco presentaba valor extremo en la producción de carne y huevo, y cuatro estados (Guanajuato, Sinaloa,

Tamaulipas y Yucatán) tenían valores extremos en la superficie de forrajes cultivados (Fig. 23a). Al final del periodo, solo se mantienen dos estados con valores extremos, Tamaulipas (forraje) y Jalisco (superficie de forrajes y producción de AOA) (Fig. 23b). Lo que nos sugiere la posibilidad de que la correlación de las dos variables ocurra en un mayor número de estados. En el Anexo B se presenta un análisis más detallado sobre la dinámica de la producción de AOA y forrajes en los estados.

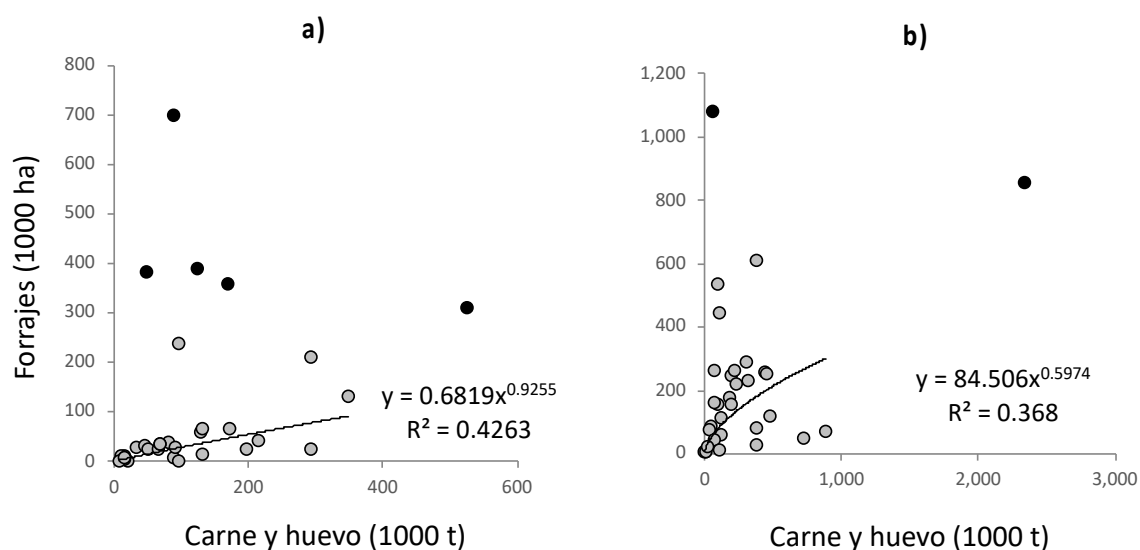


Figure 23 a y b. Correlación en el conjunto de los estados entre la superficie de forraje cultivado y la producción de carne y huevo en dos periodos: a) 1980 a 1982; y b) 2015 a 2017. Los valores corresponden al promedio de los tres años indicados. Cada punto corresponde a un estado. Puntos negros indican valores extremos no incluidos en el modelo. La línea indica el modelo potencial, que es el que mejor expresó el cambio de la correlación en el tiempo

Observando los tres periodos clave identificados a nivel nacional en la relación de cambio entre superficie de forrajes y superficie sembrada total (1) 1980 a 1993, 2) 1993 a 1997, y 3) 1997 a 2017) (Fig. 13), analizamos ahora a nivel de los estados el cambio relativo entre ambas variables. Encontramos que éstas presentan

una alta correlación en los dos últimos periodos y una baja correlación para el primero.

Es decir que entre 1980 y 1993 los cambios de la superficie sembrada total a nivel de estados se deben a cambios en otros cultivos que no son los forrajeros, pero en los dos últimos periodos están altamente correlacionados (y positivamente) con los cambios en la superficie de cultivos forrajeros (Fig. 23).

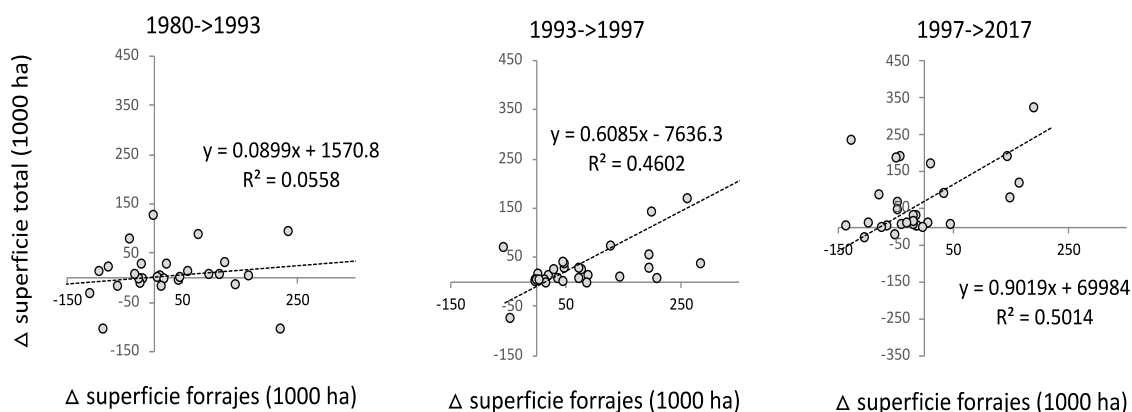


Figura 24. Cambio del área sembrada total respecto al cambio del área de forrajes cultivados en los estados de México en tres periodos: 1980 a 1993, 1993 a 1997, y 1997 a 2017.

Parámetros de las regresiones

	n	P	r₂
1980-1993	32	0.3825	0.0558
1993-1997	32	0.0018	0.4602
1997-2017	32	0.0033	0.5014

7.8 Riesgos ambientales

Tilman et al. (2001) estimaron que 87 millones de toneladas de Nf fueron usadas en el mundo en el año 2000, proyectando un consumo aproximado de 135 millones de toneladas para 2020. En México, en el año 2000 se usaron 1.34 millones de toneladas de Nf en agricultura (FAO 2017). Basados en estos datos, nuestra estimación para México en 2020 es de 2.08 millones de toneladas. Partiendo de ello, calculamos la tasa media de crecimiento anual de consumo y el consumo anual de Nf entre 2002 y 2013. El uso total de fertilizantes sintéticos nitrogenados aumentó

siete veces de una media de 11.0 a 93.1 kg ha⁻¹ (Tilman et al. 2001; FAO 2017). El uso de pesticidas también aumentó, de 2 a 3.6 kg·ha cosechada, entre 1990 y 2013 (FAO 2017). Finalmente, el área total equipada para riego aumentó de 3 a 6.5 millones de hectáreas entre 1961 y 2013.

8. DISCUSIÓN

El aumento del consumo de AOA en la dieta en México ha implicado la intensificación del sistema de producción ganadera. Esta intensificación productiva se ha reflejado en el aumento de la superficie de tierra agrícola destinada a cultivar forrajes, la cuál, incrementa cada vez más su proporción en el área agrícola total respecto al área destinada a cultivos de consumo humano directo. La intensificación productiva también ha generado el aumento de la superficie agrícola total (frontera agrícola). Por lo tanto, demostramos que el aumento de la producción de AOA ha sido un motor de los cambios del uso del suelo agrícola durante los últimos cincuenta años en México. Exploramos también otras implicaciones ambientales de la intensificación de la producción ganadera, las cuales deben ser analizadas con mayor precisión.

Nivel 1: El volumen consumido de AOA está determinado por el tamaño de la población humana y por sus hábitos alimenticios

En el periodo 1961 a 2013 la población y el consumo de AOA tuvieron una tendencia de crecimiento similar en México, lo cual es más evidente si consideramos solo a la población urbana (Fig. 2 y 3), aunque la tasa de crecimiento del consumo agregado de AOA fue mayor a la de la población. De hecho, el consumo per cápita de proteína de origen animal (carne y huevo) aumentó 160% en este periodo (Fig. 6). Es decir, una persona en México consume en la actualidad en promedio 53 kg más de carne y huevo por año que hace 50 años. Esto se ha traducido en un aumento sostenido de la participación de los AOA en el suministro de proteínas a la dieta total o lo que es lo mismo, un decremento sostenido de la participación de los alimentos de origen vegetal como porcentaje del suministro total de proteínas per cápita (Fig. 4).

Si asumiéramos, solo para efectos del análisis, que los patrones de consumo per cápita de AOA se mantienen constantes, entonces el aumento de la población por sí mismo generaría un incremento en términos absolutos del volumen de consumo de AOA. Ahora bien, dado que realmente se ha registrado un cambio de

dieta en la población de México que ha implicado el aumento en la ingesta per cápita de AOA, entonces tenemos otra fuerza adicional al crecimiento poblacional que ha impulsando el crecimiento del consumo de los AOA.

Nivel 2. El consumo de los AOA se satisface mediante la producción nacional o importación de estos productos

A finales de la década de 1980 la estrategia de producción cambió hacia la intensificación de la producción ganadera. Para sostener el aumento extraordinario en el consumo de AOA per cápita mientras la población mexicana también aumentaba a una tasa anual elevada, la producción tuvo que aumentar mucho más rápido que la población. Esto ocurrió marcadamente para la carne de pollo y huevos (Tabla V). El sistema de producción extensivo de alimentación por pastoreo para ganado vacuno se volvió inviable para cubrir la creciente demanda de AOA mientras que, la cría de animales en establos industriales y corrales de engorda empezó a ganar rápidamente relevancia en el sistema alimentario. Uno de los pilares de la intensificación del sistema productivo es la diversificación de las especies pecuarias, con preponderancia de los productos avícolas.

Debido a que la producción nacional de AOA dejó de ser suficiente para satisfacer la demanda nacional las importaciones empezaron a jugar un papel determinante (Fig. 8 y 9). Esa fue la época de la apertura de la economía mexicana al comercio internacional y también el período en el que ocurrió el cambio más acelerado en los hábitos alimenticios mexicanos (Flores et al. 2010; Barquera et al. 2013; Aburto et al. 2016). En 1994 se firmó el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) y con ello Estados Unidos se volvió el principal socio comercial de México. Las importaciones de carne (res, pollo y cerdo) provenientes de ese país crecieron, entre 1986 y 2013, de 20 mil a un millón de toneladas (63% correspondieron a carne de pollo en 2013).

Nivel 3. La producción ganadera nacional se sostiene sobre los forrajes cultivados en el país e importados.

Como consecuencia del aumento de la producción de AOA el consumo de los productos para alimentación animal también creció sostenidamente desde 1961 (Fig. 10). Durante nuestro periodo de estudio la dinámica de la producción total de alimentos de origen animal estuvo acoplada a nivel del país con la superficie agrícola destinada a los cultivos forrajeros. El efecto de intensificación de la producción de AOA sobre el uso de suelo agrícola medido como la superficie de forraje cultivado por unidad de producto animal obtenido presentó un aumento muy importante entre 1967 y 1978 (excepto 1976) cuando la tasa suelo agrícola/AOA (insumo/producto) superó una ha t⁻¹ alcanzando un máximo de 1.3 ha t⁻¹ en 1973. Estos resultados están relacionados con el crecimiento de la producción de sorgo y pastos cultivados en esos años (Barkin y DeWalitt 1985), y con un crecimiento bajo del inventario y sacrificios de ganado bovino posiblemente relacionado con cambios en el entramado jurídico de la tenencia de la tierra (Anexos C y D). Posteriormente, desde la década de 1980 la tasa (ha t⁻¹) se mantuvo relativamente estable cercana a 0.85 ha t⁻¹. Lo que se vincularía con una estabilización de los rendimientos netos de los cultivos forrajeros y de los productos ganaderos por animal sacrificado. Dado que los rendimientos de los granos y la alfalfa han aumentado considerablemente (sección 7.5) es necesario analizar los rendimientos de otros cultivos, principalmente los pastos cultivados por su gran peso en el sistema, así como de los rendimientos de los diferentes ganados, a fin de poner a prueba esta hipótesis.

Los forrajes y los pastos y praderas cultivados (Tablas III y IV) que se consumen en México se cultivan domésticamente, pero el aumento del consumo animal de granos y oleaginosas ha sido respaldado mayoritariamente por las importaciones. Desde 1992 la proporción de las importaciones de granos y oleaginosas, principalmente maíz y soya, ha representado alrededor de 60% del consumo animal total. De hecho, los granos importados son principalmente utilizados para el alimento de animales. El maíz amarillo es el principal producto agropecuario importado por México (2,602 mdd en 2017) y la soya es el segundo (2

227 mdd en 2017) (SAGARPA 2018). El 96% de las importaciones de maíz y el 90% de las de soya provienen de Estados Unidos (FAO 2017).

El aumento de la demanda de granos forrajeros también se ve reflejado en el crecimiento de la producción de alimento balanceado para animales, el cual se ha convertido en el principal producto final de alimentación para todos los tipos de ganado. La producción del alimento balanceado aumentó casi 100% desde la década de 1990, de 16.5 a 32 millones de toneladas (CANACINTRA 2004; ANFACA 2015). Aunque sus principales componentes son el maíz, el sorgo y la soya, también hay otros insumos como los derivados de granos secos de destilería (DDGS), salvados, gluten, harina de pescado, vitaminas, minerales y aminoácidos,. Por tipo de ganado, el consumo de alimento balanceado se distribuye en Avicultura (52%), Ganado porcino (16%), Bovino lechero (16%), Bovino de engorda (11%), y Mascotas 3% (ANFACA 2015).

Nivel 4. El cultivo de los forrajes consumidos en México se realiza en terrenos ubicados dentro y fuera del país, principalmente en Estados Unidos.

Durante los últimos 50 años, la producción ganadera ha cambiado claramente los patrones de uso de los terrenos agrícolas en México. El ganado, de todos los tipos, se ha convertido en un gran consumidor de productos agrícolas, a través de los cultivos forrajeros, lo que provoca que actualmente alrededor de 40% del área cosechada total de México corresponda a estos cultivos (Fig. 12), además de las crecientes importaciones mexicanas de granos y subproductos forrajeros. En la práctica, México no solo ha expandido su frontera agrícola (superficie cultivada total) para satisfacer la creciente demanda de productos forrajeros (Fig. 13 y 14) (García-Barrios et al. 2009), sino que también está trasladando su uso de los terrenos agrícolas más allá de sus fronteras (Fig. 15), un fenómeno que está aumentando a nivel mundial (Naylor et al. 2005; Meyfroidt et al. 2010).

Teniendo en cuenta los rendimientos agrícolas mexicanos en 2103, habría sido necesario agregar 5.1 millones de ha (es decir, 27% adicional del área total cosechada) para producir en el país el volumen de maíz, soya y sorgo importados para alimento de ganado ese año.

Estimamos que el cambio del uso de suelo agrícola entre 1961 y 2013 generó una reducción (0.4 a 0.1 ha persona⁻¹) en el área per cápita utilizada por los cultivos alimentarios, mientras que el área cosechada para forrajes se ha expandido durante las últimas décadas. Si se mantienen las tendencias observadas, estimamos que para el año 2027 las tierras agrícolas dedicadas a la producción de forrajes superarán a las de los cultivos alimentarios.

La población de México puede alcanzar alrededor de 148 millones para 2050 (CONAPO 2017). Una estimación conservadora de la demanda futura, basada en el consumo per cápita de 2013, refleja que se podrían consumir 26 881 millones de toneladas de AOA en México para 2050, lo que requeriría sumar 5.2 millones de hectáreas de tierra agrícola (27% del área total) para producir cultivos forrajeros.

Nivel 5. El maíz es el cultivo más representativo de México y es un objeto fundamental de estudio.

El doble uso potencial del maíz, como alimento humano directo y como alimento de ganado, hace que este cultivo sea la representación paradigmática de esta disyuntiva en el uso agrícola del suelo (Mottet et al. 2017). No solo las importaciones de maíz para alimentación animal han crecido sostenidamente desde mediados de los años 90 (Fig. 16 y 17), fundamentalmente de Estados Unidos, sino que hoy es el principal producto agropecuario importado por México.

Asimismo, la producción de maíz para consumo animal ha crecido a tasas elevadas desde la década de 1990, sin que esto haya afectado la producción de maíz para alimentación humana directa. La producción de maíz blanco (la variedad principal de consumo humano en México) no ha dejado de crecer en las últimas décadas y su disponibilidad per cápita no ha disminuido, incluso hay una sobre oferta de este producto (Galván-Miyoshi et al. 2015, Galván 2016). Sin embargo, un porcentaje

significativo de maíz blanco se destina ya a consumo animal (19%) (SAGARPA 2016b).

En un país donde el uso productivo del suelo y la sociedad misma han estado estrechamente ligados a la producción y consumo de maíz, los cambios respecto a este cultivo generan efectos económicos, sociales y culturales (Nadal 1999; Bellon y Risopoulos 2001; Fox y Haight 2010; Vargas-Parada 2014). Un cambio importante en el cultivo del maíz es el incremento de su productividad promedio (1 a 3.7) t ha⁻¹, entre 1961 y 2016, probablemente generado por una redistribución espacial de la producción hacia enclaves agroindustriales (Galván-Miyoshi et al. 2015, Galván 2016), pero que implica la posibilidad de dar mayor viabilidad productiva a las zonas de baja productividad agrícola. Un segundo cambio de gran alcance es que aunque la superficie cosechada de maíz aumentó 21% entre 1961 y 2016, su peso relativo en el total de la superficie cosechada pasó de 51% a 44%. Es decir, en términos relativos, otros tipos de cultivos se han expandido más que el maíz. Existe un proceso de diversificación en el uso del suelo agrícola y el maíz está compartiendo de manera creciente la tierra agrícola con otros cultivos. Finalmente, el tercer elemento digno de mención es que, mientras en 1961 prácticamente la totalidad de la superficie y la producción de maíz se destinaba a consumo humano, en 2016 en torno al 26% de la producción total de maíz (blanco y amarillo) es destinada al consumo animal (SAGARPA 2016b). Es decir, el consumo tradicional del maíz como alimento humano está siendo compartido cada vez más con su uso más reciente como alimento animal.

Nivel 6. ¿Cómo se manifiesta la relación entre la producción de AOA y los cambios en el uso de suelo agrícola en los estados de México?

Independientemente de que la producción animal y la superficie de forrajes cultivados aumentó en todos los estados (Anexo B), en términos relativos se ha presentado un proceso de concentración de la producción de AOA y un proceso de desconcentración de la distribución de la superficie cultivada de forrajes (Fig. 22). Al inicio de la década de 1980, la relación entre la superficie de forraje cultivado y

la producción de AOA era semejante en el conjunto de estados (correlación lineal). Al final del periodo de estudio (en la actualidad), la relación entre estas variables es de carácter exponencial (Fig. 23 a y b). Es decir, hubo un crecimiento mayor de la producción de AOA en los estados inicialmente más productivos, al tiempo que el incremento relativo en la superficie de forraje cultivado fue mayor en los estados en la que dicha superficie era baja al inicio del periodo. Ambos procesos ocurrieron mientras se mantenía el equilibrio de acoplamiento neto entre ambas variables a nivel nacional. Esto se explica porque ocurrió una redistribución relativa entre los estados, tanto en la producción de productos pecuarios como en la superficie de forraje cultivado. El 60% de los estados aumentó su superficie de forraje cultivado para satisfacer su demanda interna, pero especialmente para cubrir la demanda de los estados que iban aumentando su participación en la producción nacional.

Los cambios en la superficie de forrajes cultivados en los estados desde 1980 tuvieron correlación con las variaciones de la superficie sembrada total. Esta correlación positiva se aprecia a partir de la segunda mitad de la década de 1990, después de una primera década (1980-1990) con variaciones oscilantes en el cambio de superficie sembrada respecto al valor de 1980. Es entonces a partir de 1993 que se observa un gran crecimiento tanto de los cultivos forrajeros como del resto de los cultivos, resultando en una expansión neta de la superficie sembrada total (Fig. 24). A partir de 1997 observamos una característica diferente, mientras los cultivos de forrajes siguen extendiéndose, los no-forrajeros reducen su superficie. El aparente remplazo neto entre la superficie agrícola de forrajes y no-forrajes puede estar relacionado con las nuevas relaciones de competitividad y rentabilidad económica que incorporó la demanda creciente de forrajes por parte de la industria pecuaria, y con el aumento en la oferta de productos agrarios que impulsó la apertura comercial del país. Finalmente, la reforma de 1992 al artículo 27 constitucional, con la que culminó la <<Reforma Agraria>>, y que otorgó facultades a los ejidos para comercializar sus tierras (Warman 2003), puede haber facilitado la expansión de la superficie cultivada (Anexo D).

Nivel 7. La intensificación de la producción ganadera se relaciona con diferentes riesgos ambientales sobre la tierra, agua y aire.

El primer impacto a gran escala en el uso del suelo debido al aumento de la producción ganadera en México ocurrió especialmente en la década de 1970 y principio de los años ochenta, con la tala de bosques tropicales para abrir espacios para el pastoreo de ganado (Chauvet-Sánchez 1999; Bray y Klepeis 2005). Esto ocurrió por medio de ambiciosos programas gubernamentales para promover asentamientos agrícolas y ganaderos en el trópico húmedo, como el proyecto Uxpanapa en Veracruz, o los planes Chontalpa y Balacán-Tenosique en Tabasco. Con esa finalidad se creó la Comisión Nacional de Desmontes, una agencia gubernamental para implementar estos planes (Toledo 1978; Moreno-Unda 2011). En ese periodo, las tasas de deforestación en los trópicos aumentaron entre 4% y 5% por año en todos los bosques tropicales de tierras bajas, con la excepción del Estado de Quintana Roo (Dirzo y García 1992; Banco Mundial 1995; Velázquez et al. 2002; Mas et al. 2004). Este patrón de deforestación tropical relacionado con el desarrollo ganadero se extendió por otros países de Centro y Sudamérica. El vínculo directo entre la deforestación tropical y la cría de ganado llevó al ecologista británico Norman Myers (1981) a llamar al proceso <<la conexión de la hamburguesa>>, y la presión pública comenzó a crecer contra la pérdida de biodiversidad tropical que estaba siendo impulsada por la cría de ganado. Los desmontes también afectaron las áreas áridas y semiáridas en el norte de México, donde grandes extensiones de matorral xerófilo se transformaron en pastizales inducidos de pasto *buffel* (Moreno-Unda 2011; Narchi et al. 2015).

Además de las consecuencias del crecimiento de la ganadería extensiva, en la década de 1990 se produjo un segundo efecto de largo alcance asociado a la expansión de la producción ganadera en México, que es el creciente uso de suelo agrícola para cultivos de consumo animal. Como resultado de la presión internacional, especialmente durante la Cumbre de la ONU de 1992 en Río de Janeiro, el gobierno mexicano detuvo sus esfuerzos para expandir la agricultura a los bosques tropicales y comenzó a promover experimentos en el uso y restauración

sostenible de la tierra (Bray y Klepeis 2005). Los esfuerzos para detener la deforestación coincidieron con la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en 1994 y la apertura de la economía mexicana al comercio internacional. Para satisfacer la demanda de las clases medias urbanas de rápido crecimiento, la estrategia de producción cambió hacia la intensificación de la producción ganadera (Delgado 2003; Thornton 2010). Al mismo tiempo, la apertura al comercio internacional desde finales de los años ochenta permitió importar alimentos de origen animal y forrajes (Pérez-Espejo 1997). La industrialización de la producción y el libre comercio contribuyeron a reducir la presión sobre la deforestación. Aunque la pérdida de bosques en México sigue siendo positiva y representa serias amenazas para los sistemas naturales y la biodiversidad (Ramírez-Mejía et al. 2017; Mendoza-Ponce et al. 2018 y 2019), actualmente se ubica alrededor del 1% en la mayoría de las regiones tropicales (Díaz-Gallegos 2010; Moreno-Sánchez 2017). Si bien la alimentación del ganado con forraje cultivado permite acortar el tiempo de sacrificio y puede reducir la tasa de emisiones de metano generado por la fermentación entérica (Swain et al. 2018), también aumenta el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero originadas por la agricultura moderna (Friel et al. 2009).

La producción animal basada en agricultura intensiva puede tener por tanto efectos positivos sobre el medioambiente, como el confinamiento de la frontera agrícola y la reducción de la deforestación. Sin embargo, la producción industrializada y la intensificación del uso de la tierra pueden causar daños ambientales considerables, como los relacionados con el mal manejo del estiércol y las aguas residuales (Mekonnen y Hoekstra 2010 y 2012). Los cultivos de alimentación intensiva exigen altos niveles de pesticidas, agua y fertilizantes, mientras que las concentraciones masivas de animales generan grandes cantidades de residuos ricos en nitrógeno, a menudo cerca de los centros urbanos, que después de saturar los suelos finalmente contaminan los acuíferos y las aguas superficiales (Steinfeld et al. 2006).

La tierra, el agua de riego, el nitrógeno reactivo y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son métricas ambientales clave de los impactos ecológicos de la producción de alimentos de origen animal (Eshel et al. 2014; Sultana et al. 2014; Pikaar et al. 2018). En México, la intensificación de la agricultura se relaciona con el aumento del área equipada para el riego (más del doble desde 1961; FAO 2017) (Ran et al. 2017). Los fertilizantes y pesticidas sintéticos son insumos clave para cultivos de alto rendimiento (De Walt 1985), pero contribuyen a la carga de nutrientes, permitiendo la eutrofización de las aguas superficiales (sección 7.8). Por ejemplo, Beman et al. (2005) han demostrado que el escurrimiento agrícola rico en nitrógeno estimula las floraciones de fitoplancton en el Golfo de California, como consecuencia de la actividad agrícola industrial en el Valle del Yaqui en el Estado de Sonora. En relación con las emisiones de GEI del ganado y el estiércol en México, aumentaron durante el período de aumento acelerado del inventario de ganado (1961-1987), pero se estabilizaron durante la década de 1990, cuando las existencias de ganado se estabilizaron (FAO 2017), lo que confirma que el tamaño del rebaño de ganado es un factor importante para mitigar los efectos de los GEI (Eshel et al. 2014). Actualmente, la ganadería contribuye entre el 10% y el 15% del registro en México de GEI (INECC 2018), ligeramente menor que el promedio mundial de 15% (Rojas-Downing et al. 2017), posiblemente como resultado de las importaciones de ciertos productos agrarios de los Estados Unidos, lo que reduce el costo ambiental neto en los dos países (Martínez-Meléndez y Bennett 2016). En cualquier caso, se debe considerar que, para mantener los niveles de producción de AOA, los insumos agrícolas también tendrán que multiplicarse, aumentando los impactos ambientales por uso de agua, de los fertilizantes, pesticidas y combustibles, entre otros. Además, las reservas de animales tendrán que aumentar en cierto grado, generando más emisiones de GEI.

Predicciones recientes señalan que para el año 2050 el crecimiento agrícola será el principal impulsor de los cambios de uso de suelo (Mendoza-Ponce et al. 2019; Muscat et al. 2019). Asimismo, Ramankutty et al. (2002) advirtieron sobre la vulnerabilidad del sistema alimentario mundial debido a una disminución sostenida

en el recurso básico de la tierra productiva. En el contexto de estas predicciones nuestros resultados provocan varias preguntas sobre la viabilidad del sistema alimentario (Garnett 2009) en México ¿Cómo se logrará el consumo futuro de alimentos, aumentando la producción nacional o mediante más importaciones de alimentos y forrajes? ¿Cuánto más puede la producción ganadera ampliar su participación en el uso de la tierra? ¿Cuánta más producción agrícola y ganadera es posible alcanzar? Las respuestas a estas preguntas deben considerar que para lograr un sistema alimentario sostenible son necesarios cambios tanto en la oferta como en la demanda: mejorar la oferta y reducir la demanda y el desperdicio de alimentos (Steinfeld y Gerber 2010; Ibarrola-Rivas y Granados-Ramírez 2017; Rööös et al. 2017, White and Hall 2018; Poore y Nemecek 2018). Sin embargo, parece que las estrategias de producción, la legislación y las políticas públicas (Beraud et al. 2018) no tienen suficientemente en cuenta el impacto de la producción ganadera en el uso de la tierra y el medio ambiente, como lo indica la escasez de información oficial sobre estos temas.

Los cambios en el uso del suelo derivados del crecimiento de la producción agropecuaria son una tendencia global (Kastner y Nonhebel 2010, Kastner et al. 2012; Herrero y Thornton 2013; Sans y Combris 2015). Estudiar cómo ocurren estos cambios específicamente a nivel de cada país muestra particularidades de la asociación entre la dieta y la salud humanas con el medio ambiente, lo que debería servir para transitar hacia sistemas más sustentables.

9. CONCLUSIONES

La transición alimentaria hacia las dietas occidentalizadas ha tenido algunas consecuencias imprevistas: por ejemplo, en medio siglo, México registró una de las tasas más altas de sobrepeso y obesidad en el mundo, y alcanzó el primer lugar en obesidad infantil. La creciente disponibilidad de proteína animal ha requerido la intensificación de la producción ganadera que a su vez ha generado impactos en el uso de los terrenos agrícolas y en la degradación de los ecosistemas acuáticos y terrestres. Para adoptar dietas más equilibradas no solo debemos considerar la salud pública sino la sostenibilidad del sistema de producción de alimentos. Para esos efectos en México tenemos la ventaja de contar con una rica tradición culinaria.

A continuación, presentamos nuestras principales conclusiones sobre el proceso de cambio de uso de suelo agrícola relacionado al aumento del consumo de alimentos de origen animal en el país (datos para el periodo 1961 a 2013, excepto cuando se indique otros años):

1. El consumo agregado de carne y huevo creció 900% (1 a 10 millones de toneladas) y el per cápita 160% (33 a 86 kg·per cápita·1·año⁻¹).
2. El incremento en el consumo de proteína de origen animal en la población de México generó el aumento (790%) de la producción nacional de carne y huevo.
3. El incremento en la producción nacional de AOA se basa en la intensificación del sistema productivo que ha implicado la diversificación de las especies pecuarias, con preponderancia de los productos avícolas. La producción de carne de pollo aumentó 2008%, mientras la de huevos creció 1684%.
4. El consumo de productos para alimentar a los animales aumentó 2157%.
5. Las importaciones de granos forrajeros aumentaron rápidamente de ser prácticamente inexistentes en 1961 hasta el 60% de su consumo total en 2013, principalmente de maíz proveniente de Estados Unidos.

6. La superficie de tierra agrícola para producir cultivos de consumo animal incrementó 676%.
7. El aumento de la producción de AOA ha modificado el destino de consumo de la producción agrícola del país. En 1961, aproximadamente el 97% de la superficie sembrada se destinaba a consumo humano, pero en 2017 ese valor descendió a 64%.
8. La producción nacional de maíz para consumo humano directo es suficiente. El 19% de la producción de maíz blanco se destina a consumo pecuario.
9. Para producir en México el equivalente de las importaciones de granos para fines de alimentación animal se requeriría un 27% adicional de la superficie cosechada total en el país.
10. La producción de AOA y la extensión de forrajes cultivados a nivel nacional estuvo estrechamente acoplada entre 1961 y 2012, con una tasa insumo/producto en torno a 0.85 ha t⁻¹ desde 1980. Este resultado neto a nivel nacional responde a la dinámica de la distribución de ambas variables en los estados, con una tendencia a la concentración de la producción de AOA en algunos estados y a la desconcentración en la distribución de la superficie de forrajes cultivados.
11. Si se mantienen los estándares actuales de consumo de AOA y los niveles de productividad, para 2050 se necesitará cosechar 5.2 millones de hectáreas adicionales para satisfacer la demanda de alimentos de origen animal.
12. La superficie de forrajes cultivados en 2017 representó el 106% de la nueva superficie de cultivos establecida desde 1980 (64% desde 1961).
13. Los cambios de la frontera agrícola en los estados se correlacionan positivamente con los cambios en la superficie de forrajes cultivados en desde inicios de los años 90 (en dos periodos de 1993 a 1997 y de 1997 a 2017) pero no en la primera década analizada.
14. La alimentación del ganado con forraje cultivado puede relacionarse con efectos positivos en el medioambiente (p.e. reducción de tasas de

deforestación y reducción de la tasa de emisiones por fermentación entérica), pero también con efectos negativos (p.e. manejo de estiércol y aguas residuales, aumento del consumo de energía y de emisiones de GEI de la agricultura industrial). Se requiere estudiar estos efectos para el caso de México.

10. LITERATURA CITADA

Aburto, T. C., L. S. Pedraza, T. G. Sánchez-Pimienta, C. Batis, J. A. Rivera. 2016. Discretionary foods have a high contribution and fruit, vegetables, and legumes have a low contribution to the total energy intake of the Mexican population. *J Nutr.* 146(9):1881s-1887s.

ANFACA. 2017. Memoria económica 2016-2017. Asociación Nacional de Fabricantes de Alimentos para Consumo Animal). Guadalajara. México.

Bellon, M. R., J. Risopoulos. 2001. Small-scale farmers expand the benefits of improved maize germplasm: a case study from Chiapas, Mexico. *World Dev.* 29(5):799-811.

Beraud Macías, V., J. Sosa Ramírez., Y. Maya Delgado, M. Córdoba, A. Ortega Rubio. 2018. 84 años de políticas de uso del suelo en México: reflexiones para la conservación de la biodiversidad. *Nova Scientia.* 10(20):592-629.

Banco Mundial. 1995. Mexico Resource Conservation and Forest Sector Review. World Bank Report No. 13114-ME: Natural Resources and Rural Poverty Operations Division. Latin America and the Caribbean Regional Office. Washington D.C. 19/10/2018.

<http://documents.worldbank.org/curated/en/998301468757196117/Mexico-Resource-conservation-and-forest-sector-review>

Banco Mundial. 2018. The World Bank Open Data, Online database. 08/06/2018. <https://data.worldbank.org/>

BANXICO.1965. Informe anual 1966. Banco de México. 02/10/2018.

<http://www.anterior.banxico.org.mx/publicaciones-y-discursos/publicaciones/informes-periodicos/anual/indexpage.html>

Barkin, D. 1981. El uso de la tierra agrícola en México. *Problemas del Desarrollo.* 12:59-85.

Barkin, D., B. DeWalt. 1985. La crisis alimentaria mexicana y el sorgo. *Problemas del desarrollo.* 16(61):65-85.

Barquera, S., I. Campos-Nonato, C. Aguilar-Salinas, R. López-Ridaura, A. Arredondo, J. Rivera-Dommarco. 2013. Diabetes in Mexico: cost and management of diabetes and its complications and challenges for health policy. *Globalization Health.* 9:3.

Beman, J.M., K.R. Arrigo, P.A. Matson. 2005. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean. *Nature.* 434:211.

Bray, D.B., P. Klepeis. 2005. Deforestation, Forest Transitions, and Institutions for Sustainability in Southeastern Mexico, 1900-2000. *Environ Hist-UK*. 11:195–223.

Chauvet-Sánchez, M. 1999. *La ganadería bovina de carne en México: del auge a la crisis*. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Primera Edición. México, D.F. 206pp.

CIMMYT. 1981. *World Maize Facts and Trends, Report One: An Analysis of Changes in Production, Consumption, Trade, and Prices over the last Two Decades*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. México D.F. 37p.

CIMMYT. 1990. *1989/90 World Maize Facts and Trends: Realizing the Potential of Maize in Sub-Saharan Africa*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. México D.F. 77p.

Código Agrario 1943. Decreto que reforma el Código Agrario. *Diario Oficial de la Federación de los Estados Unidos Mexicanos*, México, D.F., 27 de abril de 1943.

Código Agrario 1950. Decreto que reforma el Código Agrario. *Diario Oficial de la Federación de los Estados Unidos Mexicanos*, México, D.F., 13 de enero de 1950.

Colchero, M., C. Guerrero-López, M. Molina, M. Unar-Munguía. 2019. Affordability of Food and Beverages in Mexico between 1994 and 2016. *Nutrients*. 11:78.

CONAPO. 2017. *Proyección de la Población 2010-2050*. Consejo Nacional de Población. 22/05/2018. <https://cutt.ly/lwklRQP>

CONEVAL. 2019. *Medición de la Pobreza*. Consejo Nacional de Evaluación de Política de Desarrollo Social. 4/06/2019. <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobrezalncio.aspx>

COTECOCA 2005. Acuerdo mediante el cual se deja sin efectos la circular del 3 de enero de 1966, mediante la cual se constituyó la Comisión Técnico Consultiva para la Determinación Regional de los Coeficientes de Agostadero e integrada por los titulares de diversas unidades administrativas de la entonces Secretaría de Agricultura y Ganadería. *Diario Oficial de la Federación de los Estados Unidos Mexicanos*, México, D.F., 13 de julio de 2005.

De Walt, B.R. 1985. Mexico's second green revolution: food for feed. *Mex Stud*. 1:29-60.

Delgado, C.L. 2003. Rising consumption of meat and milk in developing countries has created a new food revolution. *J Nutr*. 133: 3907s-3910s.

Díaz-Gallegos, J. R., J. F. Mas, A. Velázquez. 2010. Trends of tropical deforestation in Southeast Mexico. *Singapore J Trop Geo.* 31(2):180-196.

Dirzo, R., M.C. García. 1992. Rates of Deforestation in Los Tuxtlas, a Neotropical Area in Southeast Mexico. *Conserv Biol.* 6:84-90.

Drewnowski, A., and J.-P. Poulain. 2018. What Lies Behind the Transition From Plant-Based to Animal Protein? *AMA J Ethics.* 20(10):987-993.

Elferink, E.V., S. Nonhebel. 2007. Variations in land requirements for meat production. *J Clean Prod.* 15(18):1778-1786.

Eshel, G., A. Shepon, T. Makov, R. Milo. 2014. Land, irrigation water, greenhouse gas, and reactive nitrogen burdens of meat, eggs, and dairy production in the United States. *P Natl Acad Sci USA.* 111:11996-12001.

FAO. 1995. Forest Resources Assessment 1990: Global Synthesis. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. FAO forestry paper, 124, 1-44.

FAO. 2017. Base de datos FAOSTAT. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 4/07/2017. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>.

Flores, M., N. Macias, M. Rivera, A. Lozada, S. Barquera, J. Rivera-Dommarco, K.L. Tucker. 2010. Dietary Patterns in Mexican Adults Are Associated with Risk of Being Overweight or Obese. *J Nutr.* 140:1869-1873.

Fox, J. y Haight, L. (coords.). 2010. Subsidios para la desigualdad: Las políticas públicas del maíz en México a partir del libre comercio. Woodrow Wilson International Center for Scholars. México. 193p.

Friel, S., A. D. Dangour, T. Garnett, K. Lock, Z. Chalabi, I. Roberts, A. Butker, C. D. Butler, J. Waage, A. J. McMichael, A. Haines. 2009. Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: food and agriculture. *Lancet.* 374(9706):2016-2025.

Galvan-Miyoshi, Y., R. Walker, B. Warf. 2015. Land change regimes and the evolution of the maize-cattle complex in neoliberal Mexico. *Land.* 4:754-777.

Galván-Miyoshi, Y. 2016. Linking Land Change and Commodity Chains in a Globalizing World: the Case of Mexico. Tesis (Doctorado). Michigan State University.

García-Barrios, L., Y. Galván-Miyoshi, I. A. Valsieso-Pérez, O.R. Masera, G. Bocco, J. Vandermeer. 2009. Neotropical forest conservation, agricultural intensification, and rural out-migration: the Mexican experience. *Bioscience*. 59(10) 863-873.

Garnett, T. 2009. Livestock-related greenhouse gas emissions: impacts and options for policy makers. *Environ Sci Policy*. 12(4):491-503.

Gerbens-Leenes, P. W., S. Nonhebel, M.S. Krol. 2010. Food consumption patterns and economic growth. Increasing affluence and the use of natural resources. *Appetite*. 55(3):597-608.

Harris, M. 1985. *Good to Eat: Riddles of Food and Culture*. Simon & Shuster, New York. 289p.

Herrero M., P.K. Thornton. 2013. Livestock and global change: emerging issues for sustainable food systems. *P Natl Acad Sci USA*. 110: 20878–20881.

Ibarrola-Rivas, M.J., R. Granados-Ramirez. 2017. Diversity of Mexican diets and agricultural systems, and their impact on the land requirements for food. *Land Use Policy*. 66:235-240.

INECC. 2018. Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 15/09/2015. <https://www.gob.mx/inecc/documentos/investigaciones-2018-2013-en-materia-de-mitigacion-del-cambio-climatico>

INEGI. 2017. Censos y conteos de población y vivienda de México, 1950-2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 23/02/2017. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>

INEGI. 2019. Sistema de consulta de estadísticas ambientales. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 11/08/2019. http://mapserver.inegi.org.mx/ambiental/map/indexV3_FF.html

Kastner, T., S. Nonhebel. 2010. Changes in land requirements for food in the Philippines: A historical analysis. *Land Use Policy*. 27(3):853-863.

Kastner, T., M. J. I. Rivas, W. Koch, S. Nonhebel. 2012. Global changes in diets and the consequences for land requirements for food. *P Natl Acad Sci USA*. 109(18):6868-6872.

Keyzer, M.A., M.D. Merbis, I.F.P.W. Pavel, C.F.A. Van Wesenbeeck. 2005. Diet shifts towards meat and the effects on cereal use: can we feed the animals in 2030? *Ecol Econ*. 55(2):187-202.

Kolb, M., L. Galicia. 2018. Scenarios and story lines: drivers of land use change in southern Mexico. *Environ Dev Sustain.* 20(2):681-702.

LFRA. Ley Federal de Reforma Agraria. Diario Oficial de la Federación de los Estados Unidos Mexicanos, México, D.F., 16 de abril de 1971.

Martinez-Melendez, L.A., E.M. Bennett. 2016. Trade in the US and Mexico helps reduce environmental costs of agriculture. *Environ Res Lett.* 11:055004.

Mas, J. F., A. Velázquez, J. R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, C. Alcántara, G. Bocco, A. Pérez-Vega. 2004. Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico. *Int J. Appl Earth Obs.* 5(4):249-261.

McAlpine C.A., A. Etter, P.M. Fearnside, L. Seabrook, W.F. Laurance. 2009. Increasing world consumption of beef as a driver of regional and global change: A call for policy action based on evidence from Queensland (Australia), Colombia and Brazil. *Global Environ Change.* 19(1):21-33.

Mekonnen M., A. Hoekstra. 2012. A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems.* 15:401-415.

Mekonnen, M., A. Hoekstra. 2010. The Green, Blue and Grey Water Foot print of Farm Animals and Animal Products. Value of water research report 48. Delft, the Netherlands: Unesco-IHE Institute for Water Education.

Mendoza-Ponce, A., R. Corona-Núñez, F. Kraxner, S. Leduc, P. Patrizio. 2018. Identifying effects of land use cover changes and climate change on terrestrial ecosystems and carbon stocks in Mexico. *Global Environ Change.* 53:12-23.

Mendoza-Ponce, A., R.O. Corona-Núñez, L. Galicia, F. Kraxner. 2019. Identifying hotspots of land use cover change under socioeconomic and climate change scenario in México. *Ambio* 48:336-349.

Meyfroidt, P., T.K. Rudel, E.F. Lambin. 2010. Forest transitions, trade, and the global displacement of land use. *P Natl Acad Sci USA.* 107:20917-20922.

Moreno-Sánchez, R., J. M. Torres Rojo, F. Moreno-Sánchez, D. Carver, L. Niknami, E. Clay. 2017. Exploración de cambios de uso del suelo 2000-2010 a nivel nacional en México usando datos GlobeLand30 Realidad, Datos y Espacio *Revista Internacional de Estadística y Geografía.* INEGI. 8 (3):30-45.

Moreno-Unda, A.A. 2011. Efectos ambientales del Programa Nacional de Desmontes, México 1972-1982. Tesis (Maestría en Ciencias Ambientales), Universidad Autónoma de San Luis Potosí/Universidad de Ciencias Aplicadas de Colonia. Colonia. 119 p.

Mottet, A., C. de Haan, A. Falcucci, G. Tempio, C. Opio, P. Gerber. 2017. Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security*. 14:1-8.

Muscat, A., E. M. de Olde, I. J. M. De Boer, R. Ripoll-Bosch. 2019. The battle for biomass: A systematic review of food-feed-fuel competition. *Global Food Security*.100330.

Myers, N. 1981. The hamburger connection: how Central America's forests become North America's hamburgers. *Ambio*. 10:2-8.

Nadal, A. 1999. Evaluación de los efectos ambientales del Tratado de Libre Comercio de América del Norte. Comisión para la Cooperación Ambiental: Montreal. 118p.

Narchi, N. E., A. Búrquez, S. Trainer, R.F. Rentería-Valencia. 2015. Social constructs, identity, and the ecological consequences of carne asada. *J Southwest*. 57:305-336.

Naylor, R., H. Steinfeld, W. Falcon, J. Galloway, V. Smil, E. Bradford, H. Mooney. 2005. Losing the links between livestock and land. *Science*. 310(5754):1621-1622.

OCDE. 2015. Cardiovascular Disease and Diabetes: Políticas for Better Health Quality of Care. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. 17 de septiembre de 2018. <https://www.oecd.org/mexico/Cardiovascular-Disease-and-Diabetes-Policies-for-Better-Health-and-Quality-of-Care-Mexico.pdf>

Pérez-Espejo, R. 1997. El Tratado de Libre Comercio de América del Norte y la ganadería mexicana. UNAM. Primera reimpresión. México, D.F. 142p.

Pikaar, I., S. Matassa, B. L. Bodirsky, I. Weindl, F. Humpeöder, K. Rabaey, N. Boon, M. Bruschi et al. 2018. Decoupling livestock from land use through industrial feed production pathways. *Environ Sci Technol*. 52:7351-7359.

Pingali, P., A. Aiyar, M. Abraham, and A. Rahman. 2019. Transforming food systems for a rising India. Cham: Palgrave Macmillan.

Poore, J., and T. Nemecek. 2018. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*. 360: 987-992.

Popkin, B.M. 1997. The nutrition transition and its health implications in lower-income countries. *Public Health Nutr*. 1:5-21.

Popkin, B. M., and S. Du. 2003. Dynamics of the nutrition transition toward the animal foods sector in China and its implications: a worried perspective. *J Nutr.* 133:3898S-3906S.

Popkin, B.M., P. Gordon-Larsen. 2004. The nutrition transition: worldwide obesity dynamics and their determinants. *Int J Obesity.* 28:52-59.

Puyravaud, J.P. 2003. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecol Manag.* 177(1-3):593-596.

Ramankutty, N., J.A. Foley, N.J. Olejniczak. 2002. People on the land: Changes in global population and croplands during the 20th century. *Ambio.* 31:251-257.

Ramankutty, N., y O. Coomes. 2016. Land-use regime shifts: an analytical framework and agenda for future land-use research. *Ecol Soc.* 21(2):1.

Ramírez-Mejía, D., G. Cuevas, P. Meli, E. Mendoza. 2017. Land use and cover change scenarios in the Mesoamerican Biological Corridor-Chiapas, México. *Bot Sci.* 95(2):221-234.

Ran, Y., C.E. van Middelaar, M. Lannerstad, M. Herrero, I. J. de Boer. 2017. Freshwater use in livestock production—To be used for food crops or livestock feed? *Agr Syst.* 155:1-8.

Reig, N. 1985. Las tendencias alimentarias a largo plazo en México: 1950 - 1984. *Problemas del desarrollo.* 16: 61.

Rivera, J.A., T.G. de Cossío, L.S. Pedraza, T.C. Aburto, T.G. Sánchez, R. Martorell. 2014. Childhood and adolescent overweight and obesity in Latin America: A systematic review. *Lancet Diabetes Endo.* 2:321-332.

Rivera Dommarco J.A., M. A. Colchero, M. L. Fuentes, T. González de Cosío Martínez, C. A. Aguilar Salinas, G. Hernández Licona, S. Barquera S (eds). *La obesidad en México. Estado de la política pública y recomendaciones para su prevención y control.* Instituto Nacional de Salud Pública. Cuernavaca. 270p.

Rockström, J., G. A. Stordalen, R. Horton. 2016. Acting in the Anthropocene: the EAT–Lancet commission. *Lancet.* 387(10036):2364-2365.

Rojas-Downing, M.M., A.P. Nejadhashemi, T. Harrigan, S.A. Woznicki. 2017. Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management.* 16:145-163.

Rojas-García, A.R., N. Torres-Salado, S. Joaquín-Cancino, A. Hernández-Garay, M.D.L.A. Maldonado-Peralta, P. Sánchez-Santillán. 2017. Componentes del rendimiento en variedades de alfalfa (*Medicago sativa L.*). *Agrociencia*. 51:697-708.

Röös, E., B. Bajželj, P. Smith, M. Patel, D. Little, T. Garnett. 2017. Greedy or needy? Land use and climate impacts of food in 2050 under different livestock futures. *Global Environ Change*. 47:1-12.

Sánchez-Pimienta, T. G., C. Batis, C. K. Lutter, J. A. Rivera. 2016. Sugar-sweetened beverages are the main sources of added sugar intake in the Mexican population. *J Nutr*. 146(9):1888s-1896s.

Sans, P., P. Combris. 2015. World meat consumption patterns: An overview of the last fifty years (1961–2011). *Meat Sci*. 109:106-111.

SADER. 2019. Base de datos: Sistema de información para el sector agroalimentario (SIACON). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 10/09/2019. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>

SAGARPA. 2014. Estadísticas ganaderas. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 13/11/2016. <https://sagarpa.gob.mx/ganaderia/Estadisticas/Paginas/default.aspx>

SAGARPA. 2016. Base de datos: Sistema de información para el sector agroalimentario (SIACON). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). México. 10/12/2016. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>

SAGARPA. 2016b. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 30 de noviembre de 2019. <https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/planeacion-agricola-nacional-2017-2030-126813>

SAGARPA. 2017. Análisis de la Balanza Comercial Agroalimentaria. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 29 /11/2018. <https://www.gob.mx/siap/documentos/reporte-mensual-de-la-balanza-comercial-agroalimentaria-de-mexico>

SAGARPA 2018. El Sector Agroalimentario de México en el Contexto Internacional. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Presentación. Abril de 2018.

SIC. 1965. IV Censos agrícola, ganadero y ejidal 1960. Secretaría de Industria y Comercio. 12/05/2016.
https://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825110833/702825110833_1.pdf

Silva-Herzog, J. 1959. El agrarismo mexicano y la reforma agraria: exposición y crítica. En: Memoria Política de México. Fondo de Cultura Económica. México, D.F. 323p.

SIC. 1975. V Censos agrícola, ganadero y ejidal 1970. Secretaría de Industria y Comercio. México.

SPP. 1981. El sector alimentario en México. Secretaría de Programación y Presupuesto. México.

Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales, C. De Haan. 2006. Livestock's long shadow. Organización para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 392p.

Steinfeld, H., P. Gerber. 2010. Livestock production and the global environment: Consume less or produce better? P Natl Acad Sci USA. 107(43):18237-18238.

Sultana M. N., M.M. Uddin, B.G. Ridoutt, K.J. Peters. 2014. Comparison of water use in global milk production for different typical farms. Agr Syst. 129:9-21.

Swain, M., L. Blomqvist, J. McNamara, W. J. Ripple. 2018. Reducing the environmental impact of global diets. Sci Total Environ. 610-611:1207-1209.

Tilman, D., J. Fargione, B. Wolff, C. D'antonio, A. Dobson, R. Howarth, D. Schindler, W.H. Schlesinger et al. 2001. Forecasting agriculturally driven global environmental change. Science. 292:281-284.

Toledo, V.M. 1978. Uxpanapa y capitalismo en el trópico. Nexos. México. 1° de octubre de 2018. <https://www.nexos.com.mx/?p=3236>

Thornton, P.K. 2010. Livestock production: recent trends, future prospects. Philos T Roy Soc B. 365:2853-2867.

Turner, B.L., W.B. Meyer, and D.L. Skole. 1994. Global land-use/land-cover change: towards an integrated study. Ambio 23:91-95.

UNESCO. 2010. Document ITH/10/5.COM/CONF.202/6. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. 26/04/2018. <https://ich.unesco.org/en/lists>

U.S. Department of Agriculture (USDA). 2017. Production Supply and Distribution (PSD) statistics database. 07/03/2017 (<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/home>)

Vargas-Parada, L. 2014. GM maize splits Mexico: legal challenge to transgenic crops has created a rift in the country's scientific community. *Nature*. 511(7507):16-18.

Velázquez, A., J.F. Mas, J.R.D. Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, P.C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra, y J.L. Palacio. 2002. Patronos y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*. 62:21-37.

Vitousek, P.M., H.A. Mooney, J. Lubchenco, J.M. Melillo. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*. 277:494-499.

White, R.R., M.B. Hall. 2018. Respuesta a Van Meerbeek y Svenning, Emery, Springmann, et al. Clarifying assumptions and objectives in evaluating effects of food system shifts on human diets. *P Natl Acad Sci USA*. 115 (8):E1706–E1708.

WHO. 2018. Obesidad y Sobrepeso. World Health Organization. 21/10/2019. <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>

Warman, A. 2003. La reforma agraria mexicana: una visión de largo plazo. FAO. 02/12/2016. goo.gl/hSrNyC.

Willett, W., J. Rockström, B. Loken, M. Springmann, T. Lang, S. Vermeulen, T. Garnett, D. Tilman, et al. 2019. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet*. 393:447-92.

Wirsenius, S., C. Azar, G. Berndes. 2010. How much land is needed for global food production under scenarios of dietary changes and livestock productivity increases in 2030? *Agr Syst*. 103:621-638.

11. ANEXOS

Anexo A. Estimación de las tasas de cambio

Nuestra aproximación al cálculo de las tasas de cambio no es original, pero tampoco es un procedimiento estándar, por ello lo incluimos aquí. Este es un enfoque común en demografía, pero inusual en ecología, manejo de recursos naturales y economía ambiental. La fórmula más usualmente empleada en ecología y recursos naturales es la de FAO (1995): $r = (x_2/x_1)[1/(t_2 - t_1)] - 1$. El resultado matemático que obtuvimos al convertir la ecuación a su forma logarítmica es estándar, pero su uso en las ciencias ambientales es novedoso. Recomendamos consultar a Puyravaud (2003).

Desarrollo del procedimiento usado:

Asumiendo que la tasa de cambio de la población es, en cualquier momento, proporcional al tamaño total de la población, el crecimiento continuo de la población (r) puede ser descrito en términos matemáticos como $r \cdot n = dn/dt$ o, de forma alternativa, como $r = \frac{1}{n} \frac{dn}{dt}$. Recordando que la regla estándar de cálculo que dice que $\frac{d \ln(x)}{dx} = \frac{1}{x}$, entonces la ecuación de r puede escribirse como $r = \frac{d \ln(x)}{dt}$ de tal forma que, por estimación, se aproxima a $r = \frac{\Delta \ln(x)}{\Delta t}$. Ahora, si definimos el año de la primera observación como el año cero, podemos simplificar la ecuación de estimación de r como $r = \frac{\ln(x_t) - \ln(x_0)}{t}$ o, de forma alternativa como $r = \ln(x_t/x_0)/t$, en donde x_0 es el tamaño de la población inicial, x_t es el tamaño de la población después de t años, y t es el tiempo transcurrido, en años, desde la primera observación.

Cuando nuestro intervalo de datos tuvo solo dos puntos finales, usamos la ecuación del modelo diferencial descrito arriba ($r = \ln(x_t/x_0)/t$) para estimar la tasa de cambio entre el tiempo inicial (0) y el tiempo final (t) del periodo de estudio. Por otro lado, cuando tuvo múltiples puntos de datos (p. ej. datos anuales por un periodo de múltiples años) hicimos regresiones con los datos logarítmicamente transformados en contra del tiempo ($\ln(x) = a + b \cdot t$) y usamos el valor de la pendiente (b) como un estimador de la tasa (r), tal como en una regresión lineal simple el valor

de la pendiente de la línea de regresión representa la tasa de cambio promedio en la variable dependiente ($\ln(x)$), mientras la variable independiente (t) cambia. Una ventaja de este método es que el valor estimado de r no depende de dos puntos de datos extremos, sino en todos los valores del periodo. Adicionalmente, los valores de desviación estándar de las tasas estimadas por la regresión lineal pueden ser usados para probar hipótesis y hacer comparaciones.

Anexo B. Dinámica de la producción a AOA y el cultivo de forrajes en los estados de México entre 1980 y 2017

Para observar si la producción a AOA y el cultivo de forrajes se concentran o se diversifican en los estados a lo largo del tiempo, analizamos la distribución cuantitativa y porcentual de (a) producción de carne, (b) producción de huevo, y (c) superficie de cada una de las tres categorías de forraje. Para ello, ordenamos de manera decreciente para 1980 y 2017 los valores estatales de dichas variables y calculamos los valores acumulados de las mismas.

La producción de carne y huevo en los estados aumentó entre 1980 y 2017 (Fig. 28). Pero, mientras la distribución de carne en términos relativos permanecía prácticamente igual entre las dos fechas, la de huevo se concentró: en 2017, sólo dos estados producían el 72% de la producción nacional, Jalisco (54%) y Puebla (18%). En cambio, en 1980 se requerían ocho estados para sumar esa proporción de la producción de huevo en el país (Fig. 25).

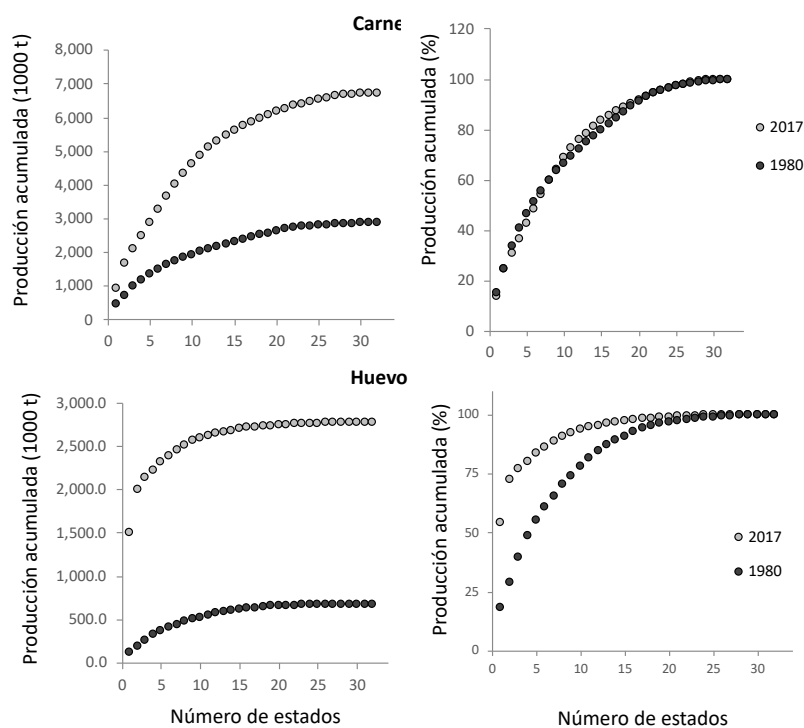


Figure 25. Distribución de la producción de carne-huevo. Lado izquierdo se muestran valores absolutos y en el derecho porcentajes. Puntos grises oscuros corresponden a 1980 y los grises claros a 2017.

La superficie de granos forrajeros (maíz amarillo, sorgo y soya) se mantuvo relativamente estable en torno a 2.3 millones de ha para todo el periodo, excepto por la caída entre 1989 y 1996, cuando se redujo a la mitad en 1993 (1.2 millones ha). Sin embargo, tanto la superficie de pastos y praderas cultivados como el resto de los cultivos forrajeros se expanden en este periodo, de 0.5 a 2.6 millones de ha (420%) los primeros, y de 0.8 a 1.9 millones de ha (137%) los últimos (Fig. 26).

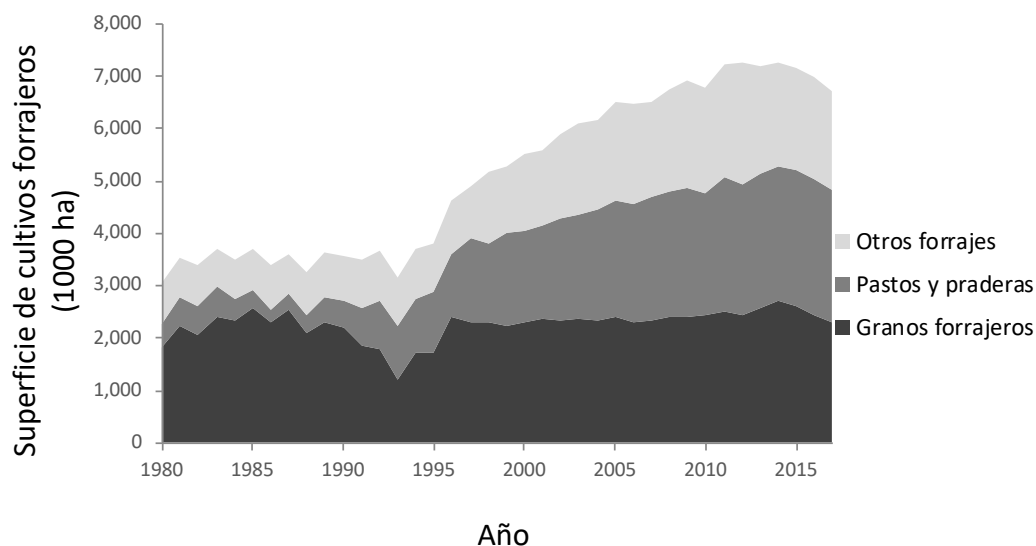


Figura 26. Superficie forrajera en México agregada a nivel nacional entre 1980 y 2017.

La superficie de los tres tipos de forrajes cultivados en los estados, aunque en distinta intensidad, aumentó durante el periodo (Fig. 29). Sin embargo, el comportamiento de la distribución porcentual fue diferente en cada categoría. Respecto a la superficie de pastos y praderas cultivadas se desconcentraron. En 1980 un solo estado, Yucatán, integraba el 79% de la extensión total. En cambio, en 2017 se necesitan los siete estados con mayor extensión para alcanzar esa proporción. La distribución porcentual de la superficie de granos forrajeros se desconcentró ligeramente entre estados, en tanto que la de otros forrajes permaneció prácticamente idéntica entre 1980 y 2017.

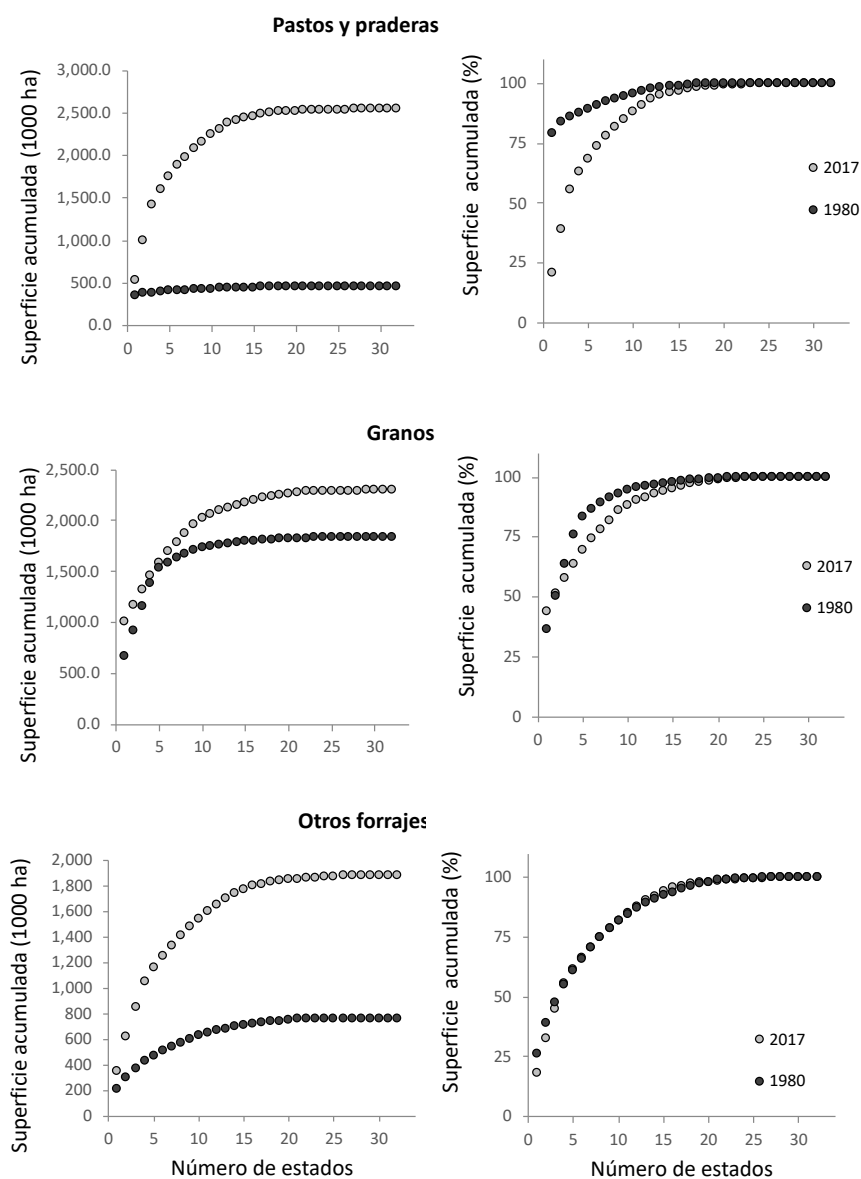


Figura 27. Distribución de la producción de la superficie de forrajes cultivados entre estados. Lado izquierdo se muestran valores absolutos y en derecho los porcentajes.

Anexo C. Población y sacrificios de ganado bovino

Se realizó una revisión exhaustiva de las fuentes oficiales existentes para el siglo 20 sobre población de ganado vacuno (Tabla IV), se analizó la coherencia y confiabilidad de los datos, y se descartaron aquellos que presentaron

comportamientos no confiables. Finalmente, se elaboró una serie temporal con información coherente para el periodo 1950-2013.

Tabla VI. Fuentes de información sobre el hato de bovinos en el siglo 20

Fuente	Resolución	Años
FAO	Nacional	1961-2013
INEGI: Censos agropecuarios	Nacional y estatal	1950, 1970, 1981, 1991 y 2007
INEGI: Anuarios estadísticos	Nacional y estatal	1950-1994
Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH)	Nacional y estatal	1972-1986
SAGARPA: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)	Nacional, estatal	1980-2013

El número de bovinos sacrificados aumentó drásticamente, de 0.9 millones de cabezas en 1955 a 8.8 millones en 2013 (tasa de crecimiento anual de 3.2%). Sin embargo, el hato nacional no aumentó tan rápidamente, ya que pasó de 14.8 millones de cabezas en 1955 a 32.4 millones en 2013 (tasa de crecimiento anual de 1.4%) (Fig.). Esto muestra que la proporción de ganado sacrificado anualmente en relación con el tamaño del stock nacional (una proporción que mide la eficiencia en el sistema de producción) aumentó tres veces, de 9 a 27% entre 1955 y 2013.

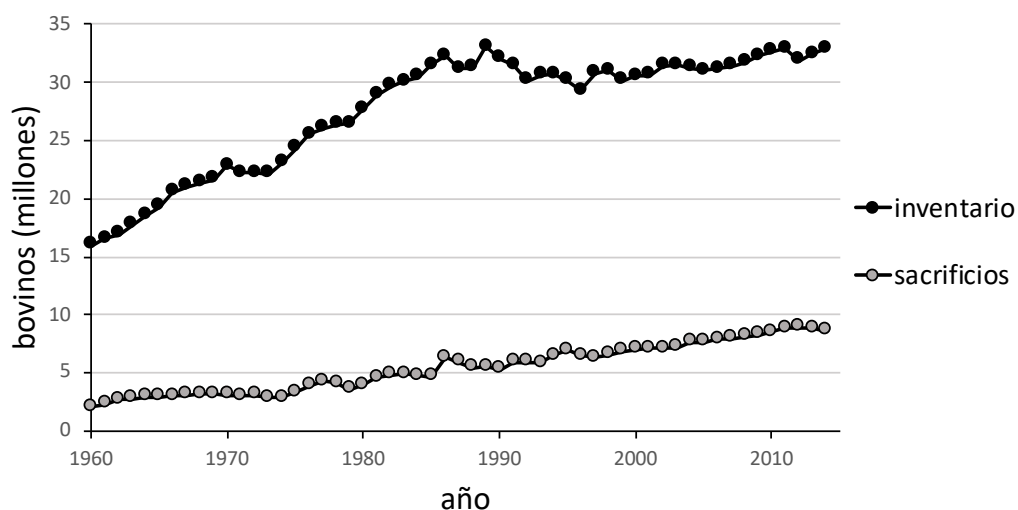


Figura 28. Inventario y sacrificios de bovinos en México entre 1960 y 2013.

Anexo D. Principales reformas jurídicas a la regulación de la tenencia de la tierra que se relacionan con la ganadería en México entre 1943 y 1991

1. Tercer Código Agrario de 1943. Introduce el concepto de pequeña propiedad agrícola y ganadera, exentándola del reparto agrario. La superficie objeto de la inafectabilidad podría aumentarse hasta el doble de la necesaria para alimentar al ganado existente, si el concesionario se obligaba a adquirir el ganado correspondiente al aumento territorial (Código Agrario 1943). Una vez terminado el periodo de la concesión de inafectabilidad, el propietario del predio tendría el derecho de escoger la superficie que conservaría de éste, como pequeña propiedad ganadera (protegida como garantía constitucional). Se establecieron también las modalidades de ejidos ganaderos y forestales.

2. Reforma al Código Agrario en 1950. En 1946 se modificó al artículo 27 constitucional para restituir el derecho al amparo agrario (Silva-Herzog 1959). La extensión máxima de propiedad pasó de un valor fijo a uno determinado por la cantidad de tierra necesaria para mantener 500 cabezas de ganado mayor o su equivalente en ganado menor, de acuerdo con la capacidad forrajera de los terrenos (Código Agrario 1950). Este procedimiento se formalizaría en la década de 1970, mediante los coeficientes de agostadero.

3. En 1962 concluyó la vigencia de 25 años de los primeros certificados de inafectabilidad ganadera. Se estableció en la Constitución que a partir de 1965 las concesiones de inafectabilidad no se volverían a otorgar ni se ampliaría la temporalidad de las que seguían vigentes. Esa decisión condujo a delimitar las áreas de la pequeña propiedad ganadera (inafectabilidad definitiva) y convertir los excedentes en ejidos agrícolas o ganaderos.
4. Se creó en 1966 la Comisión Técnico Consultiva para la Determinación de los Coeficientes de Agostadero (COTECOCA) para determinar la máxima extensión ganadera inafectable (COTECOCA 2005).
5. Ley Federal de la Reforma Agraria (1971), establece (Art. 251) la prohibición de que la pequeña propiedad permanezca sin explotación. En el artículo 258 se regula la inafectabilidad agropecuaria, que ofrece a los propietarios ganaderos la posibilidad de mantener la inafectabilidad por medio del cultivo de forrajes (LFRA 1971).
6. Reforma del artículo 27 constitucional y promulgación de la Ley Agraria en 1992. Concluye la Reforma Agraria, el valor de la tierra como capital se transfirió del Estado a los núcleos ejidales para su uso y disfrute, incluida la comercialización (Warman, 2003).

Anexo E. Artículos científicos

Artículo aceptado

Author's personal copy

Ambio
<https://doi.org/10.1007/s13280-020-01317-9>



RESEARCH ARTICLE

How dietary transition changed land use in Mexico

José Tello , Pedro P. Garcillán, Exequiel Ezcurra

Received: 13 March 2019 / Revised: 28 August 2019 / Accepted: 3 January 2020

Abstract The nutrition transition towards western diets in developing countries occurs at multiple levels, impacting health and society and also the environment. In Mexico, the shift in food consumption and production patterns, particularly in relation to animal source foods (ASF), has changed land use. We studied the consumption and production of ASF and change in agricultural land use in Mexico during the second half of the twentieth century and until 2013; using domestic and international data sources, our findings show an increasing proportion of farmed area devoted to the production of feed crops domestically, and also an increasing demand of farmed feed beyond national borders. We discuss how the intensification of livestock production is associated to major environmental threats and suggest that opportunities are available for sustainable and healthy food options.

Keywords Environmental impacts of agriculture · Food system · Land-use change · Livestock production · Nutrition transition · Sustainability

INTRODUCTION

Until the mid-twentieth century, the bulk of Mexican diet was largely based on corn, beans, and chilies grown under traditional farming methods. Corn-field weeds were harvested and consumed as greens, and the plots were inter-

cropped with beans, tomatoes, green tomatillos, and squashes, among many other species. Corn grains were treated with lime before being ground into dough in a process that increased the amount of nutritional calcium and niacin. Avocados and cacao, together with a diversity of fruits both from perennial trees and annual crops, complemented this diet. Mexico is proud of its traditional diet and has successfully nominated Mexican cuisine to be inscribed on UNESCO's List of the Intangible Cultural Heritage of Humanity. Among other elements, the World Heritage Committee's nominating document underscored the importance of traditional cuisine as a means of sustainable development (UNESCO 2010).

Despite the scientific and cultural interest of the traditional Mexican diet, the reality is that everyday food consumption in Mexico has changed drastically during the second half of the twentieth century and continues changing today. Consumption of industrialized foods with added sugars and high in saturated fats together with food from animal sources has increased substantially, while that of plant-based dietary fiber has decreased. This transition towards more westernized diets (Popkin 1997) is driven by multiple variables such as food availability and supply, time needed to purchase and cook food, or affordability (Popkin and Gordon-Larsen 2004). In Mexico, Colchero et al. (2019) found that energy-dense, industrialized foods with lower nutrient quality were economically more accessible than healthier foods such as fresh produce, especially for lower-income population. Researchers in Mexico have been monitoring this transition because of concerns of the impact of the dietary change on public health. Flores et al. (2010), for example, reported that the

Electronic supplementary material The online version of this article (<https://doi.org/10.1007/s13280-020-01317-9>) contains supplementary material, which is available to authorized users.

© Royal Swedish Academy of Sciences 2020
www.kva.se/en

Published online: 28 January 2020

emerging new dietary patterns significantly increased the risk of being overweight or obese compared with traditional Mexican diets. Similar findings have been reported in other world regions (Popkin and Gordon-Larsen 2004; Rivera et al. 2014). According to the World Health Organization, obesity in Mexico increased from 9.5 to 29% between 1975 and 2016. The rising costs of the increase in diet-related diseases have triggered alarm: The incidence of diabetes increased from 6.7% in 1994 to 15.9% in 2015 (the highest in OECD countries), and is costing the Mexican health system 1.2 thousand million US dollars every year (Barquera et al. 2013).

In 1960, México was ranked as the 16th most populated country in the world and today it occupies the tenth place (World Bank 2018). Between 1961 and 2013, the human population increased from 32.4 to 116.6 million, a 260% increase at a mean annual mean rate of 2.5%. The urban population increased from 48% of the national population in 1961 to 78% in 2013, at a rate of 3.4% (INEGI 2017). In the same period, per capita income increased 148% at a mean annual rate of 1.7%, from 3751 to 9318 US dollars (World Bank 2018).

All these changes, especially rising consumption and shifting consumption patterns by the growing urban middle class, are occurring rapidly in emerging economies (Delgado 2003; Sans and Combris 2015). Consumer decisions responsible for nutrition changes are driven by social and demographic factors, and not only by economic forces (Drewnowski and Poulain 2018; Pingali et al. 2019). The consequences of nutrition changes are complex and impact social, economic, and natural systems. Indeed, agriculture and food production in general, and livestock production in particular, are major drivers of transformation in natural ecosystems (Turner et al. 1994; Vitousek et al. 1997) and impose pressures on ecological services (Herrero and Thornton 2013; Eshel et al. 2014).

The role of sugar-sweetened beverages in the nutrition transition in Mexico and its health consequences has been widely analyzed (Aburto et al. 2016; Sánchez-Pimienta et al. 2016), but the role of animal source foods (ASF) consumption and especially its ecological effects has been less explored. Some studies have examined aspects of this relationship (Barkin 1981; Galvan-Miyoshi et al. 2015; Narchi et al. 2015; Ibarrola-Rivas and Granados-Ramirez 2017), but none have analyzed it through the entire period in which it has occurred.

The research question we intend to answer is how land use has been impacted by the growing consumption of ASF in Mexico. Additionally, we will explore and discuss the key environmental impacts linked to this land-use change. Our aim was to analyze the relationship between the temporal dynamics of consumption of livestock products as a result of the nutrition transition in the late twentieth century and its effects on land-use change due to demand of feed crops.

MATERIALS AND METHODS

The time scope of our study is the 1961–2013 period, with the exception of two variables where we analyzed a different period: (1) harvested area (1950–2013), to show an extended tendency of agricultural land use in the twentieth century; and (2) pesticides (1990–2013), because data are available only since 1990. We built time series of the variables of interest by merging data from different official sources, and when necessary interpolating information gaps. When available, we compared different data sources to verify the reliability of the data.

Human population and consumption of livestock products

We used decadal population censuses (1960 to 2010) and surveys (1995, 2005 and 2015; INEGI 2017) to integrate the annual series of the human population of Mexico between 1961 and 2013. We estimated data for inter-census years assuming a continuous population growth (Appendix S1).

We used annual data of production, imports, and exports of animal products for human consumption (i.e., animal protein such as beef, pork, and poultry, as well as milk and eggs) between 1961 and 2013 from FAOSTAT (FAO 2017) to build annual series of total consumption (production plus imports minus exports), and per capita consumption of livestock products. Finally, based on FAOSTAT balance sheets (FAO 2017) we estimated the time series of animal product participation on the total energy intake and protein supply in the Mexican population.

Feed crops

Consumption. Following official Mexican statistics (SAGARPA 2016) we considered three types of feed crops (i.e., crops destined for animal consumption): (a) grains and oilseeds, (b) dry fodder (alfalfa, oats and barley hay), and (c) other cultivated grasses. We used annual data of livestock consumption of grains (sorghum, oats, barley, and wheat) and oilseeds (including byproducts of soybean, copra, cottonseed, peanut, rapeseed, and sunflower seed) from USDA (2017). Because dry fodder and grass-hay is not imported, national production was taken as an accurate estimate of consumption. In the case of maize, we compiled data from different sources to estimate consumption and production (Appendixes S2 and S3).

Production. We used data for sorghum from USDA (2017), wheat from SAGARPA (2016), and soybeans from FAO (2017).

Author's personal copy

Ambio

Imports. We calculated feed crops imports as total consumption minus total production.

Exports. Mexican feed exports are very low or inexistent, and statistics are not available for all commodities and byproducts, so we did not integrate them into our database.

Harvested area

For 1950–1960, we used published data of total harvested area and feed crop area from Barkin (1981), and based on these data we estimated the harvested area of food crops. For 1961–2013, we compiled data from FAO (2017) and SAGARPA (2016) to estimate total harvested area in Mexico. We selected the main feed crops cultivated in Mexico (sorghum, maize, and soybeans; alfalfa, oats and barley fodder; and cultivated grasses). We used available data of annual harvested land of sorghum (FAO 2017), soybean (FAO 2017), and assembled different sources to elaborate time series of harvested land of maize; alfalfa, oats and barley fodder; and cultivated grasses. Based on total harvested and feed crops area, we estimated the harvested area devoted to food crops (see SEM for references and details).

Agricultural inputs and yields, and cattle extraction

The time series of nitrogen fertilizers includes data available in FAO (2017) for 1961–2001. We estimated data for 2002–2013 based on Tilman et al. (2001) (Appendix S5). We use data from FAO (2017) for area under irrigation and treated with pesticides. We estimated yields of maize, sorghum, soybeans, and alfalfa by dividing total production (tons) by total harvested area (ha) of each crop. Finally, we estimated the proportion of cattle slaughtered annually relative to the size of the national herd. For all these variables, we estimated the mean annual growth rates.

RESULTS

Mean per capita consumption of ASF, i.e., the five main types of livestock products combined (beef, pork, poultry, eggs, and milk), increased 73% between 1961 and 2013, from 104.8 to 181.4 kg year⁻¹. The main increment occurred in the consumption of poultry (658%), which grew from 4.2 to 31.6 kg year⁻¹, followed by eggs (396%), from 4.4 to 21.6 kg year⁻¹, beef (53%), from 10.5 to 16.1 kg year⁻¹, and pork (23%), from 13 to 16 kg year⁻¹ (FAO 2017; see Fig. 1c, d). Finally, per capita milk consumption increased 31%, from 71.8 to 94.3 L year⁻¹.

Mean energy intake in Mexico increased 32% during the study period, from 2279 to 3023 kcal person⁻¹ day⁻¹, and

the proportion of this intake from animal sources grew from 11.6 to 19.3%. Similarly, total protein supply increased 34%, from 61 to 82 g capita⁻¹ day⁻¹, and the animal participation in protein supply increased from 23.6 to 42.8% of the total diet.

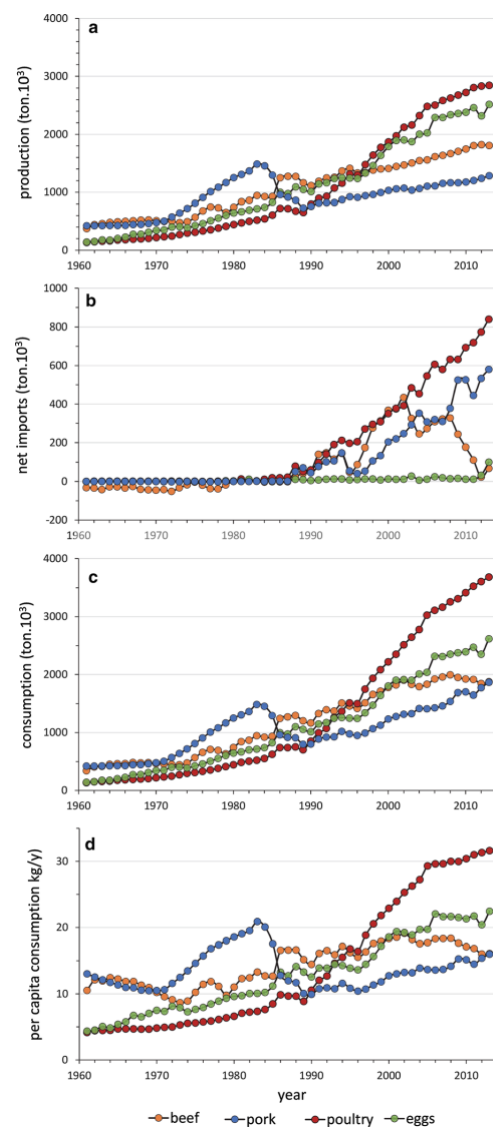


Fig. 1 Consumption of animal products (beef, pork, poultry, and eggs) in Mexico during the period 1961–2013. a Domestic production, b net imports (imports–exports), c total consumption (production + net imports), d per capita consumption

Total national production of poultry meat increased 2008% (from 0.14 to 2.8 million tons), eggs 1684% (from 141 to 2.5 million tons), beef 385% (from 0.37 to 1.8 million tons), milk 371% (from 2.3 to 11 million tons), and pork 204% (from 0.42 to 1.3 million tons) (Fig. 1a). Pork imports increased sevenfold and poultry threefold between 1990 and 2103. Beef imports increased until 2001 and since then, they have been decreasing continuously (Fig. 1b). Nearly all consumed eggs and milk have been produced domestically.

In order to sustain this increase in per capita consumption while the Mexican population was also increasing at a 2.5% annual rate, the production of livestock products had to increase much faster than the population. National production has not been sufficient to meet demand and since the end of the 1980s meat imports (all types) have also increased, representing 24% of total consumed meat in 2013. Poultry production and consumption (including eggs), increased much faster than total population. The increase in beef production was less pronounced but still higher than population growth, while pork production increased at around the same rate as the population (Table 1).

Consumption of commodities and products to feed animals (cultivated grasses, fodder, grains and oilseeds, and byproducts) rose 2157% between 1961 and 2013, from 5.3 to 119.3 million tons, at a mean annual rate of 6%. The bulk of consumption is integrated by fresh biomass of cultivated fodder, which is produced domestically almost entirely. Cultivated grasses increased from 0.02 to 49.3 million tons and fodder (mainly alfalfa) from 4.2 to 42.8 million tons, at annual mean rates of 14.7 and 4.5%, respectively.

Consumption of feed grains, oilseeds, and byproducts increased 2533% between 1961 and 2013, from one to 27 million tons, at an annual mean rate of 6.3%. Feed grains and oilseeds were mainly produced domestically during the 1960s but imports started increasing rapidly since the 1970s. In the 1980s imports of feed grains and oilseeds represented already 49% of total consumption and since 1992 the proportion of imports has settled around 60%. In 2013, most (90%) of total feed imports was made up of

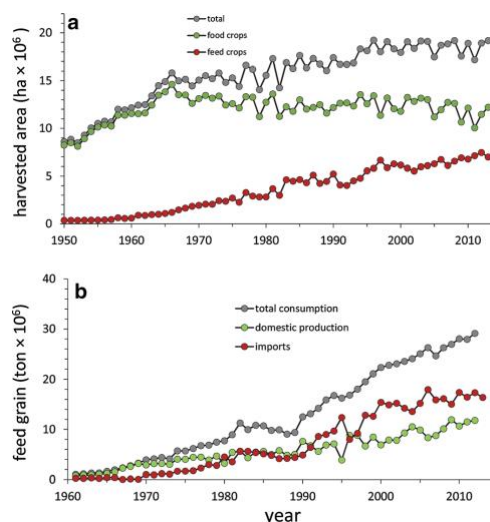


Fig. 2 Territorial expansion of the agricultural frontier in Mexico: a The development of technological intensification in the 1960s stopped the expansion of areas harvested for human consumption (green points), while the expansion of areas farmed for the production of feed (red points) continued at a mean rate of 3.9% (se \pm 0.3). b The total consumption of feed in the country (gray points) has been increasing steadily since 1960 at a mean rate of 7.0% (se \pm 0.2). This increase, however, has been supported mostly by imports, which have grown at a rate of 9.2% (se \pm 0.6), twice as fast as the increase in domestic production, which was 4.2% (se \pm 0.3) for the same period

three commodities: corn (50%), soybeans (29%), and sorghum (11%; Fig. 2b).

Agricultural inputs and yields increased during the period of analysis (Table 2). Total area equipped for irrigation increased from 3 to 6.5 million ha and total use of synthetic nitrogen fertilizers increased sevenfold from a mean of 11.0 to 93.1 kg ha⁻¹ (Tilman et al. 2001; FAO 2017). The use of pesticides rose between 1990 and 2013, from 2.0 to 3.6 kg ha⁻¹ (FAO 2017). The mean yield of two of the three main feed grains increased continuously during the last half-century: maize (0.9 to 3.0 tons ha⁻¹) and sorghum (1.8 to 3.8 tons ha⁻¹). The third feed grain yield, soybeans, decreased from 2.0 to 1.5 tons ha⁻¹. The

Table 1 Mean annual growth rates (% value \pm s.e.) in animal products (meat ? eggs) during the 1961–2013 period in Mexico. Production refers to domestic production, consumption is domestic production ? net imports, and per capita consumption is consumption divided by the national population size for the same year

	Beef	Poultry	Pork	Eggs
Production	3.10 \pm 0.11	6.45 \pm 0.08	1.86 \pm 0.24	5.43 \pm 0.13
Consumption	3.65 \pm 0.13	7.00 \pm 0.09	2.56 \pm 0.21	5.46 \pm 0.13
Per capita consumption	1.27 \pm 0.11	4.61 \pm 0.12	0.18 \pm 0.18	3.07 \pm 0.07

Author's personal copy

Ambio

Table 2 Mean annual growth rates in agricultural inputs and yields in Mexico during the 1961–2013, except for pesticides (1990–2013). Inputs refer to (1) the ratio area equipped for irrigation/total harvested area (ha); (2) the ratio nitrogenous fertilizers used per harvested area (kg/ha); and the ratio pesticides used per harvested ha (kg/ha). Yields refer to tons produced per harvested ha per crop. Cattle extraction represents the ratio slaughtered animals/national cattle stock

Inputs	Mean annual growth rates (%)
Land equipped for irrigation/total harvested area	0.65
Nitrogen fertilizers (kg/harvested ha)	4.10
Pesticides (kg/harvested ha)	2.46
Yields (tons produced/ha of harvested area)	
Maize	2.44
Sorghum	1.41
Soybeans	- 0.51
Alfalfa	2.00
Cattle extraction	
Slaughtered cattle/stock heads	1.32

yield of alfalfa, the main forage for dairy cattle, increased from 28.9 to 80.7 tons ha⁻¹ of fresh forage (equivalent to approximately 8 to 23 tons ha⁻¹ of dry biomass; Rojas-García et al. 2017; Table 2). Finally, the number of slaughtered cattle increased almost tenfold from 0.9 million heads butchered in 1955 to 8.8 million in 2013 (3.2% annual growth rate). The national herd, however, did not increase so rapidly, shifting from 14.8 million heads in 1955 to 32.4 million in 2013 (1.4% annual growth rate). This shows that the proportion of cattle slaughtered annually relative to the size of the national herd (a ratio that measures the efficiency in the production system) increased threefold from 9 to 27% between 1955 and 2013.

One of the best indicators of the impact of the dietary transition on Mexican agriculture is the proportion of farmed area devoted to the production of food for direct human consumption (food crops) relative to the area devoted to the cultivation of feed crops: The area devoted to the cultivation of food crops expanded during the mid-twentieth century, from 8.2 million ha in 1950 to 14.6 million ha in 1966 (an increase of 77%). After 1966, however, the area under food crop cultivation stabilized and gradually decreased to the current value of 12.2 million ha. Feed crops, in contrast, started to rise quickly in the 1960s: The total area devoted to the cultivation of grains, oilseeds, and other forages including cultivated grasses (Appendix S4) rose from 0.9 million ha in 1961 to 7 million ha in 2013, and, as a result, the feed-to-food area ratio rose from 0.08 in 1961 to 0.57 in 2013 (Fig. 2a).

If we assume that the reduction of around 2.4 million hectares of food crops, between 1966 and 2013, shifted entirely to feed crop production, it leaves 3.4 million hectares of net expansion of the total harvested area in the same period, displacing natural vegetation in the agricultural frontier for feed crop farming. By 2013, 36% of the total harvested land was devoted to growing feed for livestock (Fig. 2a).

Between 1961 and 2013 total maize consumption increased 400% (from 5.4 to 27 million tons); however, consumption of maize for animal feed (mainly yellow maize or corn) rose 1700% (from 0.7 to 12.8 million tons; Fig. 3a). Demand for maize for animal feed exploded since Mexico opened to international trade at the end of the 1980s, and it has been met mostly through imports. While in the early 1990s imported maize constituted ca. 20% of all maize used for animal feed, in the late 2000s imports formed ca. 70% of maize consumed for feed (Fig. 3b). Finally, total domestic production of maize increased from

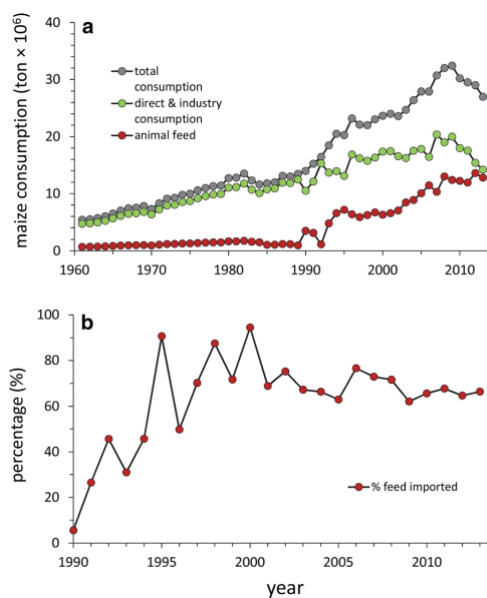


Fig. 3 Market transitions in consumption of maize: a The consumption of maize for feed in Mexico was small until the opening of imports in the 1989–1994 period. Before this period most of the maize consumed in Mexico was used for human food, mostly in the form of tortillas and nixtamalized maize flour (masa). After the opening of free trade, the percentage of maize used in Mexico for human consumption decreased gradually from 93% to 52% in 2013 (green points), while the proportion used for feed increased from 3% to 48% of the country's total consumption (red points). b The rapid increase in feed consumption was supported largely by imports; while in 1990 imported maize constituted only 6% of all maize used for animal feed, in the late 2000s imports formed ca. 70% of maize consumed for feed

6.2 to 22.7 million tons (363%) between 1961 and 2013, but the amount devoted to feed animals increased at a much faster rate, from 0.54 to 4.3 million tons (796%).

DISCUSSION

Our results highlight the important role of increasing consumption of animal protein during the last 50 years in Mexico as a driver of land-use changes. The first large-scale impact on land use due to increasing livestock production in Mexico was the clearing of tropical forests to open space for cattle grazing in the 1970s and 1980s (Bray and Klepeis 2005). Large governmental programs were established to promote agricultural and ranching settlements in the humid tropics, such as the Uxpanapa project in Veracruz, or the Chontalpa and the Balacán-Tenosique plans in Tabasco. A special governmental agency (Comisión Nacional de Desmontes) was created to promote land-clearing in the tropics (Toledo 1978; Moreno-Unda 2011). Deforestation rates throughout the tropics rose to 4–5% per year in all tropical lowland forests with the exception of the State of Quintana Roo (e.g., Dirzo and García 1992; World Bank 1995). The direct and clear link between tropical deforestation and cattle raising led the British ecologist Norman Myers (1981) to call the process “the hamburger connection,” and public pressure started to grow against the loss of tropical biodiversity that was being driven by cattle husbandry. Clearings of the natural cover also affected large arid and semi-arid areas in the north of Mexico, where scrub ecosystems were transformed into buffel grass-induced grasslands (Narchi et al. 2015).

A second far-reaching effect of livestock production in Mexico, particularly since the 1990s, was agricultural intensification. As a result of international pressure, notably during the UN Summit of 1992 in Rio de Janeiro, the Mexican Government halted its efforts to expand agriculture into tropical forests and started promoting instead experiments in sustainable land use and restoration (Bray and Klepeis 2005). The efforts to halt deforestation coincided with the signature of the North American Free Trade Agreement (NAFTA) in 1994 and the opening of the Mexican economy to international trade, a period in which the most accelerated shift in the Mexican dietary habits occurred. In order to meet the increasing demand from the rapidly growing urban middle classes, the production strategy changed towards intensification of livestock production. At the same time, international trade allowed importing feed commodities and animal products. Industrialization of production and free trade contributed to reduce pressure on deforestation. Forest loss in Mexico, though still positive, is now less than 1% in most tropical regions. Finishing cattle on grain allows shortening the

time to slaughter, which may reduce the rate of methane emissions from enteric fermentation (Swain et al. 2018) but increases energy consumption and greenhouse gas emissions from modern agriculture. Industrialized farming has intensified land use through the production of feed crops and concentrating feed-fed animals in massive enclosures. Despite some positive impacts of intensive farming, mostly related to the confinement of the agricultural frontier and the reduction of deforestation for new agricultural lands, industrialized production and land-use intensification can cause considerable environmental damages, as those related to manure and waste water mismanagement. Intensive feed crops demand high levels of pesticides, water, and fertilizers, while the massive concentrations of animals generate high amounts of nitrogen-rich waste, often close to urban centers, that after saturating the soils eventually pollute aquifers and surface water (Steinfeld et al. 2006). Although, globally, expectations have been generated around the industrial production of microbial proteins that could potentially reduce the demand for cropland area (Pikaar et al. 2018), this alternative is not yet a reality in Mexico nor are there any official plans for its promotion in the near future. During the last 50 years, livestock production has clearly changed agricultural land-use patterns in Mexico. The magnitude of the demand for animal products has turned the former extensive, grass-fed production system unviable, while, as a consequence, rearing animals in industrial barns and feedlots has rapidly gained relevance in the food system. Chicken and livestock have become a major consumer of cropland products through feed crop production, driving a 21.4% increase in the total harvested area of Mexico since 1966 (Fig. 2a), and also forcing the country to buy feed grains and other commodities abroad. In practice, Mexico is not only expanding its agricultural frontier domestically in order to meet the growing demand for feed but it is also consuming farmed feed from beyond its borders (mostly the USA), a phenomenon that seems to be increasing globally (Meyfroidt et al. 2010). Considering Mexican agricultural yields in 2103, it would have been necessary to add 5.6 million ha (i.e., and additional 29.4% of the total harvested area) to produce domestically the total feed production of maize, soybeans, and sorghum that were imported that year from the USA.

Recent predictions suggest that by year 2050 agricultural growth will be the major driver of land-use change (Mendoza-Ponce et al. 2019). Per capita area used by food crops shrunk between 1961 and 2013, from approx. 0.36 to 0.10 ha person⁻¹, while the harvested area for feed has been expanding during the last decades. Based on the observed trends, we estimate that by year 2027 agricultural land devoted to feed production will surpass that of food crops. Indeed, Ramankutty et al. (2002) warned on the

Author's personal copy

Ambio

vulnerability of the global food system that is caused by the sustained decrease in the land resource-base (i.e., population grows much faster than the every time scarcer cropland). These predictions trigger several questions about the viability of the food system in Mexico: How will future food consumption in Mexico be fulfilled, by increasing domestic production or through more imports of food and feed commodities? How much more can livestock production expand its share of land use? How much more agricultural and livestock production is it possible to reach? The answers to these questions should consider that changes in supply and demand are necessary to achieve a sustainable food system by improving supply and reducing demand and waste (Röös et al. 2017, White and Hall 2018). It seems, however, that production strategies, legislation, and public policies are not taking sufficiently into account the impact of the emerging modes of livestock production on land use and on the environment, as indicated by the scarcity of official information on these topics.

Land, irrigation water, reactive nitrogen, and greenhouse gases (GHG) emissions are key environmental metrics of the ecological impacts of feed production (Eshel et al. 2014). In Mexico, the intensification of agriculture relates to the increase of the area equipped for irrigation (more than doubled since 1961; FAO 2017). Synthetic fertilizers and pesticides are key inputs to high-yielding crops (De Walt 1985), but they contribute to nutrient loading, enabling eutrophication of surface water (Steinfeld et al. 2006). For example, Beman et al. (2005) have shown that nitrogen-rich agricultural runoff stimulates phytoplankton blooms in the Gulf of California as a consequence of high-input agricultural activity in the Yaqui Valley in the State of Sonora. In relation to GHG emissions in Mexico, GHG from livestock and manure increased during the period of accelerated increase of the cattle inventory (1961–1987) but leveled off during the 1990s, when cattle stocks stabilized (FAO 2017), confirming that the size of the cattle herd is a major factor to direct GHG (Eshel et al. 2014). Currently, livestock breeding contributes some 10–15% of the national GHG inventory (INECC 2018), less than the global average of ca. 15% (Rojas-Downing et al. 2017), possibly as a result of feed imports from the USA, which reduces the net environmental cost of agriculture in Mexico (Martinez-Melendez and Bennett 2016).

Projecting current trends, the population of Mexico may reach around 148 million by 2050 (CONAPO 2017). A conservative estimation of future demand, based on 2013 per capita consumption, shows that 26 881 million tons of livestock products may be consumed in Mexico by 2050, requiring an additional 5.2 million hectares of national agricultural area to produce feed crops equivalent to 27.1% of today's harvested area. Agricultural inputs will also have to multiply in order to catch up with production, increasing

the environmental impacts of fertilizers, pesticides and fuel, among others. Additionally, animal stocks will have to increase in certain degree, generating more GHG emissions.

Maize (*Zea mays* L.) was domesticated in what is now Mexico around 7000 years ago (Piperno and Flannery 2001), and maintains in south-central Mexico its center of germplasm diversity (Vargas-Parada 2014). Maize is the most important crop in the diet of Mexicans, representing 85% of total grain production (SAGARPA 2016), and is an essential element in the national culture. Production of maize for feed has been evolving at high rates, but this has not affected the production of maize for food, which has been stable around 17 million tons (including around 4.5 million tons harvested for self-consumption). A similar shift in the production of maize from food to feed has been reported in India by Pingali et al. (2019). Our results suggest that there is enough production of grain for human consumption in Mexico, although there is an increasing dependence on corn imports from the USA, largely driven by the increasing consumption of livestock products.

CONCLUSION

The increasing consumption of ASF is deteriorating human and natural systems alike globally (Willett et al. 2019). In Mexico, the availability of animal protein as a component of the national dietary transition has been crucial to reduce malnutrition. However, this transition has had some unforeseen consequences: For example, in half a century Mexico reached first place in the world in childhood obesity (INSP 2016). Intensification of livestock production has also had impacts on land use and in the degradation of aquatic and terrestrial ecosystems. Although the stabilization of extensive livestock production has reduced the rate of conversion of tropical forests into induced grasslands, in Mexico, the agricultural production for feed for barn and feedlot rearing of animals has increased the demand for new croplands, expanding the agricultural frontier, putting pressure over food crop fields, and requiring more water and other agricultural inputs like fertilizers, linked to large-scale pollution processes. Increasing consumption of livestock products has also driven increasing corn imports, mostly from the USA.

Our analysis provides an insight at a national scale of land-use changes and large-scale environmental impacts induced by the increasing demand for ASF in the Mexican diet. Compared to the direct effects on human health, these environmental changes have been a less-discussed consequence of the transition that has occurred in the Mexican diet during the last half-century. We demonstrate that if these trends continue the environmental sustainability of

Mexican food production will be seriously challenged. The adoption of more balanced food diets by the majority of Mexicans, taking advantage of the country's rich culinary tradition, would contribute to an improvement of both public and ecosystem health. Human diets have transcendent ecological impacts that should be seriously considered at the individual and family level, and also by legislation and policy, in relation to the country's food system.

Acknowledgements This study is part of the first author's (José Tello Carrasco) PhD research, supported by a scholarship from CONACYT. We also appreciate the kind help of the workers of INEGI and the library Ing. José Luis de la Loma y de Oteyza (SIAP-SAGARPA). We are in debt with Associate Editor Linley Chivona-Karlton and an anonymous reviewer for their helpful comments and very constructive criticism.

REFERENCES

- Aburto, T.C., L.S. Pedraza, T.G. Sánchez-Pimienta, C. Batis, and J.A. Rivera. 2016. Discretionary foods have a high contribution and fruit, vegetables, and legumes have a low contribution to the total energy intake of the Mexican population. *The Journal of Nutrition* 146: 1881–1887. <https://doi.org/10.3945/jn.115.219121>.
- Barkin, D. 1981. The use of agricultural land in Mexico. *Problemas del Desarrollo* 12: 59–85 (In Spanish).
- Barquera, S., I. Campos-Nonato, C. Aguilar-Salinas, R. López-Ridaura, A. Arredondo, and J. Rivera-Dommarco. 2013. Diabetes in Mexico: Cost and management of diabetes and its complications and challenges for health policy. *Globalization and Health* 9: 1–9. <https://doi.org/10.1186/1744-8603-9-3>.
- Bray, D.B., and P. Klepeis. 2005. Deforestation, forest transitions, and institutions for sustainability in Southeastern Mexico, 1900–2000. *Environment and History* 11: 195–223. <https://doi.org/10.3197/096734005774434584>.
- Beman, J.M., K.R. Arrigo, and P.A. Matson. 2005. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean. *Nature* 434: 211–214. <https://doi.org/10.1038/nature03370>.
- Colchero, M., C. Guerrero-López, M. Molina, and M. Unar-Munguía. 2019. Affordability of food and beverages in Mexico between 1994 and 2016. *Nutrients* 11: 1–13. <https://doi.org/10.3390/nu11010078>.
- CONAPO. 2017. Population projections 2010–2050. Retrieved June 4, 2018, from <https://cutt.ly/wk1RQP> (In Spanish).
- Delgado, C.L. 2003. Rising consumption of meat and milk in developing countries has created a new food revolution. *The Journal of Nutrition* 133: 3907–3910. <https://doi.org/10.1093/jn/133.11.3907S>.
- De Walt, B.R. 1985. Mexico's second green revolution: Food for feed. *Mexican Studies* 1: 29–60.
- Dirzo, R., and M.C. García. 1992. Rates of deforestation in Los Tuxtlas, a neotropical area in Southeast Mexico. *Conservation Biology* 6: 84–90.
- Drewnowski, A., and J.-P. Poulain. 2018. What lies behind the transition from plant-based to animal protein? *AMA Journal of Ethics* 20: 987–993. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1997.tb01593.x>.
- Eshel, G., A. Shepon, T. Makov, and R. Milo. 2014. Land, irrigation water, greenhouse gas, and reactive nitrogen burdens of meat, eggs, and dairy production in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 111: 11996–12001. <https://doi.org/10.1073/pnas.1402183111>.
- FAO. 2017. FAOSTAT statistics database. Retrieved July 1, 2017, from <http://www.fao.org/faostat/en/#data>.
- Flores, M., N. Macías, M. Rivera, A. Lozada, S. Barquera, J. Rivera-Dommarco, and K.L. Tucker. 2010. Dietary patterns in Mexican adults are associated with risk of being overweight or obese. *The Journal of Nutrition* 140: 1869–1873. <https://doi.org/10.3945/jn.110.121533>.
- Galvan-Miyoshi, Y., R. Walker, and B. Warf. 2015. Land change regimes and the evolution of the maize-cattle complex in neoliberal Mexico. *Land* 4: 754–777. <https://doi.org/10.3390/land4030754>.
- Herrero, M., and P.K. Thornton. 2013. Livestock and global change: Emerging issues for sustainable food systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 110: 20878–20881. <https://doi.org/10.1073/pnas.1321844111>.
- Ibarrola-Rivas, M.J., and R. Granados-Ramírez. 2017. Diversity of Mexican diets and agricultural systems, and their impact on the land requirements for food. *Land Use Policy Journal* 66: 235–240. <https://doi.org/10.14350/lig.57538>.
- INECC. 2018. National inventory of greenhouse gases emissions. Retrieved September 15, 2015, from <https://www.gob.mx/inecc/documentos/investigaciones-2018-2013-en-materia-de-mitigacion-del-cambio-climatico> (In Spanish).
- INEGI. 2017. Population and housing census of México, 1950–2010. Retrieved February 23, 2017, from <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/> (In Spanish).
- INSP. 2016. Encuesta Nacional de Salud y Nutrición de Medio Camino. Instituto Nacional de Salud Pública, México. Retrieved 23 June, 2018, from <https://www.insp.mx/avisos/4576-resultados-ensanut-mc-2016.html> (In Spanish).
- Martínez-Meléndez, L.A., and E.M. Bennett. 2016. Trade in the US and Mexico helps reduce environmental costs of agriculture. *Environmental Research Letters* 11: 2–13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/055004>.
- Mendoza-Ponce, A., R.O. Corona-Núñez, L. Galicia, and F. Kraxner. 2019. Identifying hotspots of land use cover change under socioeconomic and climate change scenario in México. *Ambio* 48: 336–349. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1085-0>.
- Meyfroidt, P., T.K. Rudel, and E.F. Lambin. 2010. Forest transitions, trade, and the global displacement of land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 107: 20917–20922. <https://doi.org/10.1073/pnas.1014773107>.
- Moreno-Unda, A.A. 2011. Environmental effects of the National Tree Clearing Program, Mexico 1972–1982. MSc Thesis. Cologne, Germany and San Luis Potosí, México. Universidad Autónoma de San Luis Potosí and Cologne University of Applied Sciences.
- Myers, N. 1981. The hamburger connection: How Central America's forests become North America's hamburgers. *Ambio* 10: 2–8.
- Narchi, N.E., A. Búrquez, S. Trainer, and R.F. Rentería-Valencia. 2015. Social constructs, identity, and the ecological consequences of carne asada. *Journal of the Southwest* 57: 305–336.
- Pikar, I., S. Matassa, B.L. Bodirsky, I. Weindl, F. Humpenöder, K. Rabae, N. Boon, M. Bruschi, et al. 2018. Decoupling livestock from land use through industrial feed production pathways. *Environmental Science and Technology* 52: 7351–7359. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00216>.
- Pingali, P., A. Aiyar, M. Abraham, and A. Rahman. 2019. Transforming food systems for a rising India. Cham: Palgrave Macmillan.
- Piperno, D.R., and K.V. Flannery. 2001. The earliest archaeological maize (*Zea mays* L.) from highland Mexico: New accelerator mass spectrometry dates and their implications. *Proceedings of*

Author's personal copy

Ambio

- the National Academy of Sciences USA 98: 2101–2103. <https://doi.org/10.1073/pnas.98.4.2101>.
- Popkin, B.M. 1997. The nutrition transition and its health implications in lower-income countries. *Public Health Nutrition* 1: 5–21. <https://doi.org/10.1093/jn/133.11.3898S>.
- Popkin, B.M., and P. Gordon-Larsen. 2004. The nutrition transition: Worldwide obesity dynamics and their determinants. *International Journal of Obesity* 28: 52–59. <https://doi.org/10.1038/sj.ijo.0802804>.
- Ramankutty, N., J.A. Foley, and N.J. Olejniczak. 2002. People on the land: Changes in global population and croplands during the 20th century. *Ambio* 31: 251–257. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.3.251>.
- Rivera, J.A., T.G. de Cossío, L.S. Pedraza, T.C. Aburto, T.G. Sánchez, and R. Martorell. 2014. Childhood and adolescent overweight and obesity in Latin America: A systematic review. *Lancet Diabetes & Endocrinology* 2: 321–332. [https://doi.org/10.1016/S2213-8587\(13\)70173-6](https://doi.org/10.1016/S2213-8587(13)70173-6).
- Rojas-Downing, M.M., A.P. Nejadhashemi, T. Harrigan, and S.A. Woznicki. 2017. Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management* 16: 145–163. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001>.
- Rojas-García, A.R., N. Torres-Salado, S. Joaquín-Cancino, A. Hernández-Garay, M.D.L.A. Maldonado-Peralta, and P. Sánchez-Santillán. 2017. Componentes del rendimiento en variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Agrociencia* 51: 697–708.
- Röös, E., B. Bajželj, P. Smith, M. Patel, D. Little, and T. Garnett. 2017. Greedy or needy? Land use and climate impacts of food in 2050 under different livestock futures. *Global Environmental Change* 47: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.09.001>.
- SAGARPA. 2016. SIACON statistics database. Retrieved September 10, 2016, from <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119> (In Spanish).
- Sánchez-Piñeira, T.G., C. Batis, C.K. Lutter, and J.A. Rivera. 2016. Sugar-sweetened beverages are the main sources of added sugar intake in the Mexican population. *Journal of Nutrition* 146: 1888–1896. <https://doi.org/10.3945/jn.115.220301>.
- Sans, P., and P. Combris. 2015. World meat consumption patterns: An overview of the last fifty years (1961–2011). *Meat Science* 109: 106–111. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.05.012>.
- Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, and C. de Haan. 2006. *Livestock's long shadow: Environmental issues and options*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Swain, M., L. Blomqvist, J. McNamara, and W.J. Ripple. 2018. Reducing the environmental impact of global diets. *Science of the Total Environment* 610–611: 1207–1209. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.125>.
- Tilman, D., J. Fargione, B. Wolff, C. D'antonio, A. Dobson, R. Howarth, D. Schindler, W.H. Schlesinger, et al. 2001. Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science* 292: 281–284.
- Toledo, V.M. 1978. Uxpanapa: Ecocide and capitalism in the tropics. *Nexos*. Mexico. Retrieved October 1, 2018, from <https://www.nexos.com.mx/?p=3236> (In Spanish).
- Turner, B.L., W.B. Meyer, and D.L. Skole. 1994. Global land-use/land-cover change: Towards an integrated study. *Ambio* 23: 91–95.
- UNESCO. 2010. Document ITH/10/5.COM/CONF.202/6, 6 October 2010, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris. Retrieved October 1, 2018, from <https://ich.unesco.org/en/lists>.
- USDA. 2017. Production Supply and Distribution (PSD) statistics database. Retrieved March 7, 2017, from <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#app/home>.
- Vargas-Parada, L. 2014. GM maize splits Mexico. *Nature News* 511: 1–16.
- Vitousek, P.M., H.A. Mooney, J. Lubchenco, and J.M. Melillo. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277: 494–499.
- White, R.R., and M.B. Hall. 2018. Reply to Van Meerbeek and Svenning, Emery, and Springmann, et al.: Clarifying assumptions and objectives in evaluating effects of food system shifts on human diets. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 115: 1706–1708. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720895115>.
- Willett, W., J. Rockström, B. Loken, M. Springmann, T. Lang, S. Vermeulen, T. Garnett, D. Tilman, et al. 2019. Food in the Anthropocene: The EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet* 393: 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4).
- World Bank. 1995. *Mexico-resource conservation and forest sector review*. Washington, DC. Retrieved February 2, 2018, from <http://documents.worldbank.org/curated/en/998301468757196117/Mexico-Resource-conservation-and-forest-sector-review>.
- World Bank. 2018. The World Bank open data. Retrieved June 8, 2018, from <https://data.worldbank.org/>.

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

AUTHOR BIOGRAPHIES

José Tello (&) is a doctoral candidate at the Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). His research interests include land use change, food systems and environmental conservation policy.

Address: Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Av. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, 23205 La Paz, BCS, Mexico.
e-mail: jcarrasco@pg.cibnor.com; tellojos2@gmail.com

Pedro P. Garcillán is a Professor at the Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). His research interests include desert plant ecology and effects of human activities on dynamics of plant communities.

Address: Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Av. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, 23205 La Paz, BCS, Mexico.
e-mail: pp Garcillan@cibnor.mx

Exequiel Ezcurra is a Professor at the University of California, Riverside. His research interests include quantitative ecology, desert ecology and biogeography.

Address: Department of Botany and Plant Sciences, University of California Riverside, 900 University Ave, Riverside, CA 92521, USA.
e-mail: exequiel@ucr.edu

Artículo sometido



Nova Scientia

León, Guanajuato a 27 de enero de 2020

Estimado José Tello-Carrasco:

Nova Scientia es una publicación electrónica con enfoque multidisciplinario que tiene como propósito servir como vehículo para acercar, y en lo posible conectar, diversas disciplinas científicas, así como para difundir los nuevos conocimientos de los distintos campos del saber.

Con el fin de medir la calidad, factibilidad y rigurosidad científica de los artículos recibidos, el Consejo Editorial de **Nova Scientia** revisa su pertinencia antes de someterlos al sistema de evaluación denominado revisión por pares o peer review que realizan los expertos. Consiste en que dos revisores leen y analizan los artículos para determinar tanto la validez de las ideas y los resultados así como su posible impacto científico.

Su artículo *"Acoplamiento regional de la producción animal y la superficie de forraje cultivado en México, 1980-2017"* en coautoría con Pedro P. Garcillán y Exequiel Ezcurra fue recibido el 27/01/2020 y actualmente está en proceso de dictamen.

Esperamos que la información proporcionada sirva para los fines que convienen a su amable persona.

ATENTAMENTE



Mtro. José Luis Álvarez Espinosa
Gestor de la Revista



Nova Scientia
Revista de Investigación de la Universidad De La Salle Bajío
<http://novascientia.delasalle.edu.mx>

Nova Scientia ISSN 2007 - 0705 está indizada en:

CONACYT <http://www.conacyt.gob.mx/comunicacion/IndiceRevistas/Paginas/Indice8.aspx>

Latindex <http://www.latindex.org/buscador/ficRev.html?folio=19346&opcion=1>

DOAJ <http://www.doaj.org/openurl?genre=journal&issn=20070705>

Redalyc <http://www.redalyc.org/src/inicio/HomRevRed.jsp?CveEntRev=2033>

Dialnet <http://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?codigo=13824>

SciELO http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_serial&pid=2007-0705&lng=es&nrm=iso

Av. Universidad 602, Col. Lomas del Campestre, C.P. 37150, León, Guanajuato México. Tel. 52 477 7108500

Acoplamiento regional de la producción animal y la superficie de forraje cultivado en México, 1980-2017

Regional coupling of livestock production and forage cropland in Mexico, 1980-2017

José Tello Carrasco¹, Pedro P. Garcillán¹ y Exequiel Ezcurra²

Palabras clave: Acoplamiento geográfico, cambio uso de suelo, forraje cultivado, producción animal.

Keywords: Feed crops, geographical coupling, land use change, livestock production.

Recepción: 01-02-20XX / Aceptación 01-02-20XX

Resumen

Introducción: La intensificación de la producción animal, necesaria para satisfacer el aumento del consumo de productos de origen animal a nivel global, ha requerido un creciente uso de suelo agrícola para cultivos de alimentación animal. Este requerimiento puede afectar la disponibilidad de suelo para otros cultivos y/o aumentar la presión sobre la frontera agrícola. La manera en que se acopla regionalmente la producción animal y la superficie de cultivo para su alimentación al interior de un país determina en gran medida los cambios de uso de suelo asociados. En este estudio analizamos la dinámica geográfica entre la producción animal y la superficie de cultivo asociada en el interior de México entre 1980 y 2017, así como sus efectos sobre la superficie sembrada total y la superficie de cultivos de consumo humano directo.

Método: Con base en datos oficiales elaboramos las series anuales de la superficie sembrada de cultivos de consumo animal y de la producción animal para los estados de México entre 1980–2017. En primer lugar, analizamos la variación temporal de estas dos variables dentro de cada estado y la asociación geográfica de las mismas entre los estados a lo largo del tiempo. Posteriormente, analizamos la relación de los cambios de la superficie de cultivo destinado al ganado con los cambios en la superficie sembrada para consumo humano directo y de la superficie sembrada total.

Resultados: En términos generales se observa una especialización dentro de cada estado hacia la producción animal o hacia el cultivo para uso animal. Después de un periodo de

gran variabilidad en la relación, a partir de 2002 la asociación regional de la producción animal y la superficie de de cultivo de consumo animal entre los estados se estabiliza y consolida hacia una relación de tipo potencial. Los cambios de la superficie de uso animal tuvieron una correlación positiva significativa con la variación de la superficie sembrada total durante prácticamente todo el periodo (1981–2017), pero sólo mostraron correlación significativa, y negativa, con la superficie de los cultivos de consumo humano directo entre 1997–2011.

Discusión o Conclusión: El fuerte incremento de la producción animal y de la superficie de cultivada para su consumo que ocurre en México entre 1980–2017 se ha organizado geográficamente sobre la especialización, y complementariedad, hacia la producción animal de algunos estados y el cultivo de uso animal en otros. Esta distribución espacio-temporal de la superficie de cultivo afectó a la superficie sembrada total, pero no a la superficie de cultivos de consumo humano directo, excepto entre 1997-2011.

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, B.C.S., México. E-mail: ppgarcillan@cibnor.mx

²University of California, Riverside, California, USA.

© Universidad De La Salle Bajío (México)

Abstract

Introduction: The intensification of livestock production, necessary to satisfy the increasing consumption of animal protein, has required a growing use of agricultural land for livestock consumption. This requirement can affect land availability for food crops and/or increase the pressure on the agricultural frontier. The regional coupling of livestock production and land used for feed crops within a country determines the associated land use changes. In the present study we analyzed the geographical dynamics of livestock production and agricultural area destined to feed crops within Mexico between 1980 and 2017, as well as its effects on the total cropland and the extension of land used for food crops.

Method: Based on Mexican governmental statistics we elaborated the annual series of land used for feed crops and total livestock production for all Mexican states between 1980–2017. First, we analyzed temporal change of these two variables within states and their

geographical association among states through time. Secondly, we analyzed the relationship of the changes in land used for feed crops with the observed changes in land cultivated with food crops and in total cropland.

Results: A temporal specialization in livestock production or in land for feed crops is observed within each state. After a period of changing relationship, since 2002 the regional association of livestock production and land for feed crops among states stabilized and became consolidated in a power type relationship. Changes in land for feed crops showed a positive statistically significant correlation with total cropland variation through almost the entire period, 1981–2017; but only showed statistically significant, and negative, correlation with changes in land used for food crops between 1997–2011.

Discussion or Conclusion: The sharp increase in animal production and the area cultivated for feed crops occurring in Mexico between 1980–2017 has been geographically organized on specialization, and complementarity, towards animal production in some states and forage cultivation in others. This spatio-temporal distribution of the surface of feed crops affected the total planted area, but not the area cultivated of food crops, except between 1997-2011.

Introducción

El crecimiento del consumo de alimentos de origen animal desde mediados del Siglo XX ha generado profundos cambios a nivel global en los sistemas de producción agropecuarios y en el uso de suelo asociado a los mismos (Kastner et al. 2012). A partir de los 1960s, en Iberoamérica se estimuló la ganadería extensiva a través de la expansión de la superficie de pastoreo, con el efecto asociado sobre la deforestación (Myers 1981; Hecht 1993). Sin embargo, la tasa de crecimiento en el consumo de alimentos de origen animal no puede ser satisfecha con la producción extensiva y ha implicado necesariamente la transición hacia la intensificación productiva, hacia el cultivo de forraje para alimentación animal (Thornton 2010). Se estima que en 2006 se destinaron a nivel global un total de 560 millones de hectáreas, 40% del total de la tierra arable disponible, para cultivar alimento para ganado (Mottet et al. 2017). Esto tiene potenciales efectos en la competencia por el uso del suelo agrícola entre cultivos para uso humano directo y cultivos para consumo animal (Mottet et al. 2017), y también en el cambio de uso de suelo y deforestación (Barreto et al. 2013; Gasparri et al. 2013).

En México, durante las décadas de 1960–1980 el crecimiento en la demanda de proteína animal se intentó satisfacer a través de la expansión del sistema extensivo de pastoreo. Se estimuló la producción bovina a partir de ambiciosos programas de apertura de nuevos pastizales, cuyas consecuencias en el cambio de uso de suelo han sido ampliamente señalados (Dirzo y García 1992; Mas et al. 2004; Moreno-Unda 2011; Mendoza-Ponce et al. 2018). Simultáneamente se inició el desarrollo del proceso de intensificación de la producción animal, basado en el uso de suelo agrícola para cultivar distintos tipos de cultivos destinados para el ganado. El creciente uso de suelo agrícola en México desde finales de la década de 1960s para producir cultivos de consumo animal, especialmente sorgo, despertó una extensa discusión durante los 1980s sobre lo que se denominó la *ganaderización* del campo (e.g., Barkin 1981; Barkin y DeWalt 1985; DeWalt 1985; Fernández-Ortiz y Tarrío-García 1988; Pérez-Espejo 1988; Villafuerte-Solís y Pontigo-Sánchez 1990). Es decir, las múltiples implicaciones que podría tener la expansión de los cultivos forrajeros sobre la frontera agrícola, los cultivos de uso humano directo, estructuras productivas y sociales, etc. Esta discusión no ha hecho sino intensificarse y crecer en complejidad en las últimas décadas

a nivel mundial (e.g., Mottet et al. 2017; Ran et al. 2017; Makkar 2018; Poore y Nemecek 2018; Muscat et al. 2019).

Con el cultivo agrícola del alimento para el ganado se abre la posibilidad de segregación espacial de la producción animal y la de su alimento, que pueden estar desacopladas entre países (Naylor et al. 2005), pero también entre distintas regiones al interior de un país. En un reciente estudio (Tello-Carrasco et al. *en prensa*) mostramos la necesidad de suelo agrícola para cultivo de forraje que ha implicado el aumento de la producción animal en México desde 1960, y que en 2017 representó el 31% del suelo agrícola total cosechado en el país. Sin embargo, las cifras a nivel nacional a lo largo del tiempo corresponden al balance neto de las expansiones y contracciones de la superficie agrícola que ocurren en los estados. Esta dinámica espacio-temporal del uso de suelo agrícola al interior del país es el motor responsable de los cambios de uso de suelo. Tenemos poco conocimiento sobre la manera en que el incremento nacional de suelo agrícola para la producción animal se ha distribuido geográficamente entre los estados, ni qué tan variable ha sido esta distribución a lo largo del tiempo o sus efectos sobre el cambio de uso de suelo. Galván-Miyoshi et al. (2015) han sugerido la tendencia hacia una posible especialización entre regiones de México en distintas etapas de la cadena productiva de carne de res.

El objetivo del presente estudio es analizar el efecto que la intensificación de la producción animal ocurrida en México desde 1980 ha tenido sobre el uso de suelo agrícola. En concreto, analizamos en primer lugar la dinámica espacio-temporal (dentro y entre estados) de la relación entre producción animal y la superficie de cultivo para consumo animal; y posteriormente, el efecto de los cambios de la superficie de cultivos para uso ganadero ha tenido sobre la superficie cultivada total y sobre la superficie cultivada de los cultivos de consumo humano directo.

Método

Denominamos forraje a cualquier cultivo destinado al consumo animal, tanto en forma de grano como de consumo en verde o cualquier tratamiento previo. Estudiamos el efecto que ha tenido la intensificación de la producción de proteína animal ocurrida en México entre 1980 y 2017 sobre el uso agrícola del suelo, tanto a nivel del país como entre los estados. En concreto, analizamos la dinámica temporal durante este periodo de: (1) la relación entre la producción de carne-huevo y la superficie de forraje cultivado, y (2) el efecto de los cambios en la superficie de forraje sobre la superficie sembrada de cultivos no forrajeros y sobre la superficie sembrada total.

Con base en datos oficiales del Gobierno de México (SAGARPA 2018a, b) construimos las series anuales por estado y año (1980–2017) de (1) la producción de huevo y carne de todas las especies (bovino, ovino, porcino, caprino y pollo), y (2) la superficie sembrada de los cultivos forrajeros (Anexo 1), no forrajeros y total.

En respuesta al primer objetivo, analizamos el cambio relativo de la producción de carne-huevo y de la extensión de forraje cultivado en el conjunto del país respecto a sus respectivos valores de 1980. Realizamos el mismo análisis de crecimiento relativo respecto a 1980 de ambas variables en el interior de cada uno de los estados. Por otra parte, analizamos la correlación entre la producción de carne-huevo en los estados y su superficie de forraje cultivado para cada año entre 1980 y 2017. En cada fecha, identificamos los estados con valores extremos (*outliers*) de superficie de forraje o de producción animal, y una vez extraídos, ajustamos para el resto de estados un modelo de correlación. Consideramos valores extremos aquellos superiores a la suma del cuartil superior más tres veces la distancia intercuartil (Q_s+3d_Q).

Por último, y en relación al segundo objetivo, construimos la serie nacional de la superficie agrícola sembrada anualmente entre 1980 y 2017 e identificamos los periodos temporales diferenciados de cambio. Para cada uno de estos periodos, analizamos la correlación entre la variación de la superficie de cultivos forrajeros en los estados y el cambio en los mismos de la extensión de cultivos no forrajeros y de la superficie sembrada total.

Resultados

La superficie de forraje cultivado en el conjunto de México muestra un estrecho acoplamiento temporal con la producción de carne y huevo (Fig. 1). Durante la primera década las dos variables permanecen sin crecimiento apreciable; en el caso de la producción animal hasta 1990 y en la superficie de forraje cultivado hasta alrededor de 1994. Posteriormente, el crecimiento de las dos variables se acompaña hasta 2012, año en que la superficie de forraje cultivado se estabiliza, e incluso posteriormente decrece, mientras la producción animal mantiene su tasa de crecimiento.

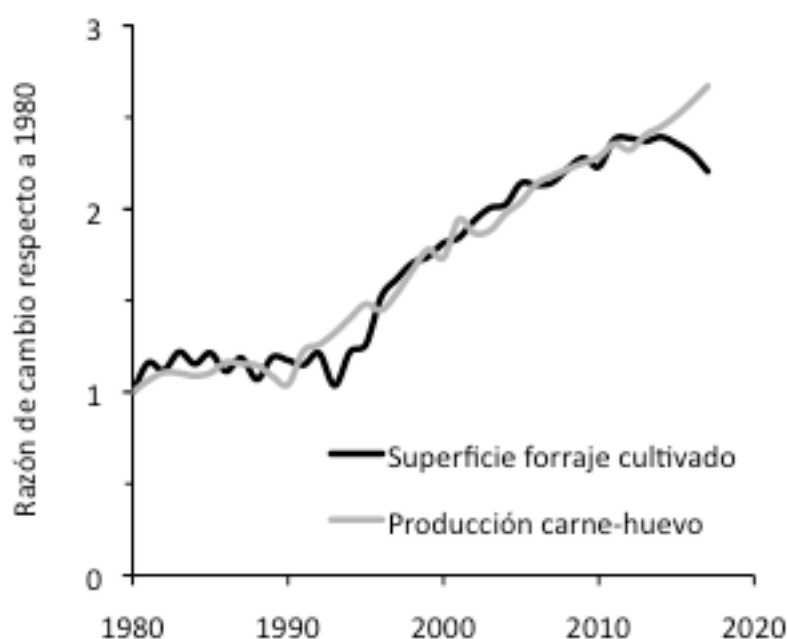


Figura 1. Variación de la razón de la producción de carne y huevo (línea gris), y de la superficie de forraje cultivado (línea negra) en México entre 1980 y 2017, respecto a sus respectivos valores de 1980.

En el interior de los estados, durante la primera década la producción animal y la superficie de forraje cultivado muestran un estancamiento similar al nacional. Pero, a partir de 1990–1995 inicia el crecimiento y el desacoplamiento entre dichas variables. Al final del periodo de estudio se observa un doble proceso de especialización (Fig. 2): (i) hacia la producción animal (e.g., Aguascalientes, Baja California, Guanajuato, Jalisco, Puebla, Querétaro, Sinaloa y Yucatán), donde la $P_{2017/1980} > 3$ y $P_{2017/1980} > 2 F_{2017/1980}$; y (ii) hacia la producción

de forraje (e.g., Campeche, Chiapas, Coahuila, Colima, Guerrero, Hidalgo, Mexico, Nayarit, Oaxaca, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tabasco y Zacatecas), cuya $F_{2017/1980} > 3$ y $F_{2017/1980} > 2 P_{2017/1980}$.

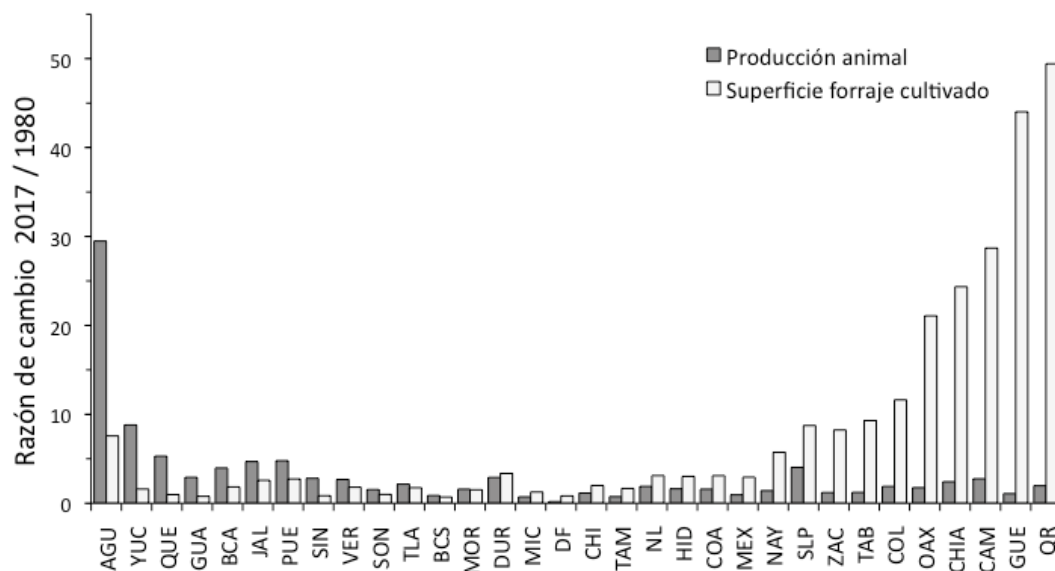


Figura. 2. Distribución de la razón de la producción animal (gris) y de la superficie de forraje cultivado (blanco) de 2017 respecto a 1980 en los estados de México.

La redistribución geográfica de los cambios en las dos variables entre los estados a lo largo del periodo se ajusta a un modelo potencial ($y = a \cdot x^b$). Antes de 2002 esta redistribución es variable, como sugieren los cambios del valor del exponente entre 0.6 y 1.6 (Fig. 3a). Incluso, entre 1980 y 1993 la producción animal estatal disminuye progresivamente su conexión

respecto a la superficie de forraje cultivado, como indicaría la reducción progresiva de la correlación desde $r_2 = 0.45$ a inicios de los 1980s hasta $r_2 = 0.27$ en 1993 (Fig. 3c). A partir de 1994 la producción animal estatal se reconecta de nuevo con la superficie forrajera local (aumenta r_2 ; Fig. 3c) y después de 2002 la conexión se estabiliza. A partir de este año la redistribución geográfica entre producción y superficie forrajera se consolida. Se estabiliza el nivel de correlación ($r_2 = 0.37$; Fig. 3c), decrece de manera continuada el valor del exponente desde 0.94 hasta 0.58 en 2017 (Fig. 3a) y el coeficiente, que previamente había presentado valores por debajo de 2 (76% de los años), aumenta exponencialmente hasta alcanzar el valor de 90.6 en 2017 (Fig. 3b). En síntesis, entre 1990 y 2017 aumentan tanto la producción animal como la superficie forrajera y estos cambios se traducen geográficamente al interior del país en una moderada concentración estatal de la producción animal y una generalizada desconcentración en la distribución de la superficie forrajera.

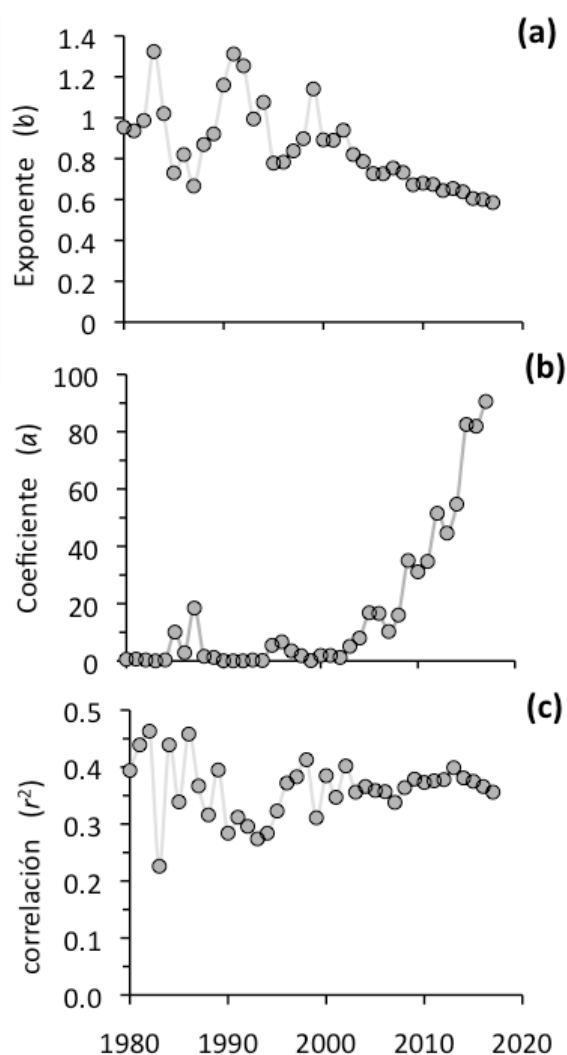


Figure. 3. Relación entre la producción anual de carne-huevo y la superficie de forraje cultivado en los estados de México. Variación temporal de los parámetros del modelo potencial ($y = a \cdot x^b$) de cada año: (a) exponente, (b) coeficiente, y (c) nivel de correlación (r^2).

En la dinámica de la superficie sembrada nacional entre 1980 y 2017 se pueden observar cinco periodos diferenciados con los siguientes cambios (Fig. 4): (i) 1980-1: $+ 2.1 \cdot 10^6$ ha, (ii) 1981-93: $- 1.5 \cdot 10^6$ ha, (iii) 1993-7: $+ 3.3 \cdot 10^6$ ha, (iv) 1997-2011: $+ 0.046 \cdot 10^6$ ha, y (v) 2011-2017: $- 0.5 \cdot 10^6$ ha.

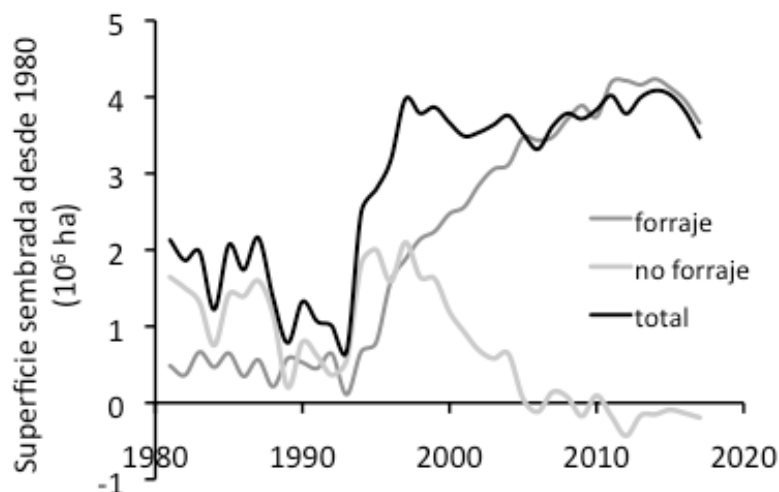


Figura. 4. Cambio neto a nivel nacional respecto a 1980 de la superficie sembrada total (línea negra), de cultivos forrajeros (línea gris oscuro) y de cultivos no forrajeros (línea gris claro).

A nivel de los estados, el cambio de la superficie forrajera cultivada estuvo asociado positiva y significativamente con el cambio en la superficie sembrada total entre 1981 y 2017 (Fig. 5; Cuadro 1a, b). La correlación es más intensa en los periodos de 1993–1997 ($y = 61,510 + 0.756 x$, $r_2 = 0.46$, $F_{1,30} = 25.57$, $P < 0.0001$) y 2011–2017 ($y = 4,447 + 1.305 x$, $r_2 = 0.57$, $F_{1,30} = 39.41$, $P < 0.0001$). En cambio, la variación de la superficie de forraje estatal sólo estuvo asociado significativamente, de forma negativa, con los cambios en la extensión de cultivos no forrajeros entre 1997 y 2011 ($y = -22,840 - 0.664 x$, $r_2 = 0.37$, $F_{1,30} = 18.02$, $P = 0.0002$) (Fig. 5, Cuadro 1b). Es decir, la variación en la superficie forrajera de los estados se realiza a expensas de cambios, positivos o negativos, en la superficie sembrada total, especialmente en 1993–97 y 2011–2017; pero sólo se observa sustitución por cultivos no forrajeros entre 1997–2011, con apenas efecto en la frontera agrícola en este periodo.

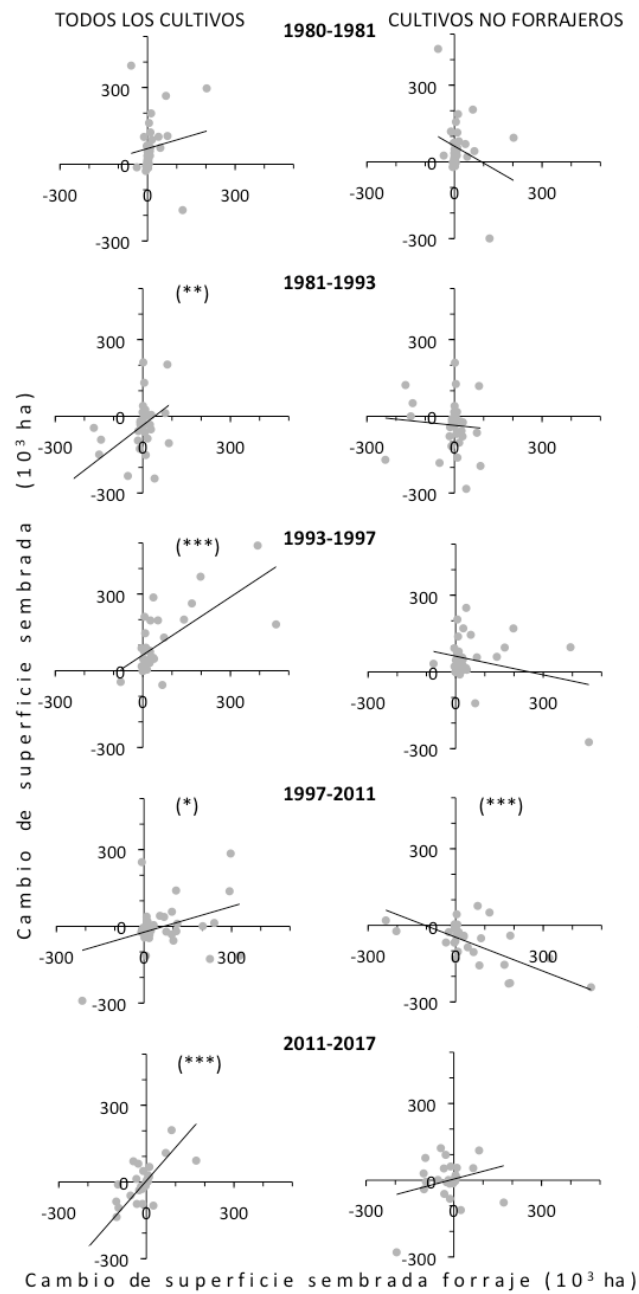


Figure. 5. Correlación entre los cambios de la superficie sembrada de forrajes y: (i) la superficie sembrada de todos los cultivos, y (ii) la superficie de cultivos no forrajeros en los

estados de México, entre 1980-2017. Significancia: (*) < 0.05, (**) < 0.01, (***) < 0.001.

Ver Cuadro 1 para detalles de los modelos de regresión.

Cuadro 1. Parámetros de los modelos de regresión lineal ($y = a + b \cdot x$) entre el cambio de superficie de forraje cultivado (x) y: (a) el cambio de superficie sembrada total, (b) el cambio de superficie de cultivo no forrajera entre los 32 estados de México, en distintos periodo entre 1980-2017.

(a)

Periodo	a	b	r^2	$F_{1,30}$	P	Sign.
1980-1981	6,1430	0.338	0.02	0.65	0.4268	
1981-1993	-35,350	0.880	0.27	11.11	0.0023	**
1993-1997	61,510	0.756	0.46	25.57	< 0.0001	***
1997-2011	-22,840	0.335	0.13	4.59	0.0403	*
2011-2017	4,447	1.305	0.57	39.41	< 0.0001	***

(b)

Periodo	a	b	r^2	$F_{1,30}$	P	Sign.
1980-1981	61,430	-0.662	0.08	2.50	0.1246	
1981-1993	-35,350	-0.120	<0.01	0.21	0.6517	
1993-1997	61,510	-0.244	0.08	2.65	0.1135	
1997-2011	-22,840	-0.664	0.37	18.02	0.0002	***
2011-2017	4,447	0.305	0.07	2.15	0.1525	

Sign. = Significancia estadística: (*) < 0.05, (**) < 0.01, (***) < 0.001.

Discusión

La producción animal y la superficie de forrajes a nivel nacional muestran un acoplamiento temporal a lo largo de todo el periodo, excepto entre 1990–1993 y posteriormente a 2011. El abasto de forraje, medido en hectáreas, por cada tonelada de producción animal obtenida se ha mantenido relativamente constante.

En cambio, la relación entre producción animal y la superficie de forraje, al interior de los estados y entre los estados, ha cambiado a lo largo del tiempo. Después de una primera

década (1980–1990) de aparente inconsistencia geográfica entre estas dos variables, desde mediados de los 1990s la asociación geográfica de las mismas se refuerza y se consolida a partir de 2002. Se produce durante este periodo la especialización de un grupo de estados hacia la producción animal y otro grupo más extenso que se especializa en superficie de forraje cultivado. Esto sugeriría que los estados de mayor producción animal pasan a ser abastecidos al menos parcialmente, otra parte procedería de forraje importado, por el exceso de forraje del resto de los estados. Esta redistribución geográfica y temporal mantiene una fuerte complementariedad interna pues permite la constancia de la razón entre superficie de forraje cultivado y producción animal a nivel nacional a lo largo del tiempo.

La disponibilidad de forraje nacional se estanca entre 1980 y 1994, pero la producción animal repunta su crecimiento a partir de 1990, en que comienza a crecer apoyada inicialmente en la importación de forraje accesible después de la apertura comercial iniciada en 1986, y consolidada después de 1994 con la firma del Tratado de Libre Comercio de Norteamérica (TLCN). Las importaciones pasaron de representar en 1990 el 14% del total de forraje consumido, al 32% en 1995 (Tello et al. en prensa). A partir del crecimiento de la superficie nacional de forraje cultivado desde 1994, la producción animal se sustentará en la combinación de ambas fuentes de forraje, producción nacional e importación (77% vs. 23% en 2013, respectivamente; Tello et al. en prensa).

A partir de 2012 parece haber un freno en la expansión de la superficie de forraje cultivado, pero se mantiene la tasa de crecimiento de producción animal. La importación de alimento para ganado de acuerdo a datos de FAOSTAT (FAO 2018) no aumenta en este periodo, al contrario, muestra una tendencia descendente entre 2010 y 2014. La producción de forraje nacional de acuerdo a los datos de SIACON (SAGARPA 2018a) no disminuye, sino al contrario, sigue aumentando. Esto sugiere un reajuste en el uso del suelo cultivado para forraje, bien a través de la reorganización de los tipos de forraje y/o en la productividad nacional promedio de los mismos. Quizá esta reorganización fue “disparada” por la fuerte sequía de 2011 en que se perdió la cosecha del 20% de la superficie sembrada a nivel nacional (SAGARPA 2018b).

El crecimiento generalizado de la superficie cultivada de forrajes en los estados tuvo efecto sobre su superficie sembrada total a lo largo de todo el periodo, especialmente entre

1993–1997 y 2011–2017. Pero, aparentemente, no afectó a la extensión de los cultivos no forrajeros, excepto entre 1997 y 2011. En estos años (de hecho entre 1997 y 2005) los dos millones de hectáreas de cultivos no forrajeros que se habían añadido desde 1980 desaparecen, al tiempo que la superficie de cultivo forrajero aumenta en un valor semejante. La fuerte asociación negativa de estas dos variables en los estados (Fig. 5b) sugiere que en estos años se produce un fuerte reemplazo al interior de los mismos entre ambos tipos de cultivos.

Entre 1981 y 1993 se produce la mayor reducción (-1.5·10⁶ ha) de la superficie sembrada total durante el periodo de estudio. Sin embargo, durante este periodo se ha estimado la mayor expansión de la categoría de uso de suelo agrícola de México (Mendoza-Ponce et al. 2018; Cuadro 2). Si bien la superficie sembrada no equivale directamente a cobertura agrícola, la contradicción de estas tendencias puede ser parcialmente debido al extenso intervalo temporal (1978–1990) de los datos de campo de la Serie I de la Carta de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI a la que Mendoza-Ponce et al. (2018) asocian 1985 como año base.

Cuadro 2. Comparación cronológica entre el cambio de uso de suelo agrícola: (a) Mendoza-Ponce et al. (2018), (b) Paz-Pellat et al. (2019), y (c) la variación de la superficie sembrada total estimada en el presente estudio.

Periodo	Cambio de uso de suelo agrícola (ha)		Cambio de superficie sembrada (ha)
	(a)	(b)	(c)
1985-1993	6,412,000		-1,397,320
1993-2002	2,695,500	2,805,371	2,868,554
2002-2007	1,535,000	1,798,713	77,756
2007-2011	484,400	511,383	403,512
2011-2014		-8,635	66,038
2014-2016		-12,267	-264,596

El intervalo de mayor crecimiento de la superficie sembrada ocurrió entre 1993 y 1997. El incremento de uso de suelo agrícola entre 1993 y 2002 se ha estimado en 2.8·10⁶ ha (Mendoza-Ponce et al. 2018; Paz-Pellat et al. 2019) (Cuadro 2), equivalente al incremento

observado de la superficie sembrada para este periodo ($2.8 \cdot 10^6$ ha; Cuadro 2). Esta equivalencia sugeriría que la expansión de la superficie sembrada ocurrió a expensas de la expansión de la frontera agrícola. Y dado que el aumento de la superficie sembrada entre 1993 y 2002 se debe prácticamente en su totalidad a los cultivos forrajeros ($2.7 \cdot 10^6$ ha), podríamos considerar a los mismos como responsables del cambio de uso de suelo asociado a esta expansión de la frontera agrícola. La misma interpretación se puede extender al periodo 2007–2011, en que la expansión del suelo agrícola es equivalente al aumento de la superficie sembrada ($0.5 \cdot 10^6$ ha; Cuadro 2) e igualmente, los cultivos forrajeros serían los responsables de dicho aumento ($+ 0.717 \cdot 10^6$ ha vs. $- 0.313 \cdot 10^6$ ha de cultivos no forrajeros).

La interpretación de la discrepancia entre la magnitud del cambio de uso de suelo y de la superficie sembrada no es clara para el resto de los intervalos, especialmente para 2002–2007 ($1.8 \cdot 10^6$ ha vs. 78,000 ha) y 2014–2016 ($-12,000$ ha vs. $-0.265 \cdot 10^6$ ha) (Cuadro 2). En el primer caso es difícil de explicar, incluso aunque se sumaran las 456,000 ha de superficie sembrada que se reducen, suponiendo que se siguieran interpretando como superficie agrícola, y las 534,000 ha de aumento parcial de la superficie sembrada. En el caso de 2014–2016 se podría suponer también el mismo argumento: se reduce la superficie sembrada en $0.25 \cdot 10^6$ ha, pero no afecta apenas a la extensión de uso de suelo agrícola porque aunque están sin cultivar, y dado el corto periodo de dos años, se siguen considerando como suelo de uso agrícola.

La comparación entre la dinámica de la superficie sembrada (el motor funcional del uso agrícola del suelo) y la extensión del suelo agrícola (expresión espacial del uso de suelo agrícola) sugiere que dichas variables no siempre van acompañadas y su análisis puede aportar información interesante sobre la dinámica del cambio del uso de suelo.

Conclusiones

México ha tenido una transición histórica de un sistema de producción de carne basado en pastoreo a un sistema industrial en el que la producción de proteína animal se basa cada vez más en la alimentación de animales en encierros con forrajes cultivados bajo sistemas de producción agrícola. A nivel nacional, el principal impulsor de la expansión de la frontera

agropecuaria es ahora el cultivo de forrajes, ya sea en forma de granos como maíz para engorda o de plantas herbáceas como alfalfa. Como resultado de ello, existe a nivel nacional un muy preciso acomplamiento temporal entre la producción animal y la superficie de cultivos para forraje. Sin embargo, a nivel de los estados de la República Mexicana esta correlación no se ha mantenido: Ha habido una creciente especialización dentro de cada estado ya sea hacia la producción animal o hacia la producción de forrajes. Implícitamente, la transición en la producción de carne que ocurrió a finales del Siglo XX ha permitido una creciente “división de tareas” en la que algunos estados con sistemas agrícolas altamente eficientes producen los forrajes necesarios para la producción nacional de carne y huevo, y otros estados son los que absorben esa oferta agrícola para abastecer sus corrales de engorda y criaderos de aves.

Agradecimientos

Este estudio es parte de la tesis doctoral del primer autor (J.T.C.), que fue posible gracias a una beca de doctorado de CONACYT. Agradecemos la amable ayuda y asistencia del personal de INEGI y de la biblioteca “Ing. José Luis de la Loma y de Oteyza” (SIAP-SAGARPA).

Referencias

- Barreto, Aberto G.O.P., Göran Berndes, Gerd Sparovek & Stefan Wirsenius. (2013).
Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: an analysis of the 1975–2006 period. *Global Change Biology* 19: 1804–1815.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12174>
- Barkin, David. (1981). El uso de la tierra agrícola en México. *Problemas del Desarrollo* 12: 59–85.
- Barkin, David & Billie R. DeWalt. (1985). La crisis alimentaria mexicana y el sorgo. *Problemas del Desarrollo* 16 (61): 65–85.
- Barkin, D., Rosemary L. Batt & Billie R. DeWalt. (1990). Food crops vs. feed crops: global substitution of grains in production. Lynne Rienner Publishers, Inc.

- DeWalt, Billie R. (1985). Mexico's second green revolution: food for feed. *Mexican Studies/Estudios Mexicanos* 1(1): 29–60.
- Dirzo, Rodolfo & María C. García. (1992). Rates of deforestation in Los Tuxtlas, a neotropical area in Southeast Mexico. *Conservation Biology* 6: 84–90.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2018). FAOSTAT statistics database. Trade. <http://www.fao.org/faostat/en/#data> (15 de diciembre de 2018)
- Fernández-Ortiz, Luis M. & María Tarrío-García. (1988). Ganadería y crisis agroalimentaria. *Revista Mexicana de Sociología* 50(1): 51–95.
<https://doi.org/10.2307/3540503>
- Galván-Miyoshi, Yankuic, Robert Walker & Barney Warf. (2015). Land change regimes and the evolution of the maize-cattle complex in neoliberal Mexico. *Land* 4: 754–777. <https://doi.org/10.3390/land4030754>
- Gasparri, Nestor I., Ricardo Grau & Jorgelina Gutiérrez Angnese. (2013). Linkages between soybean and neotropical deforestation: Coupling and transient decoupling dynamics in a multi-decadal analysis. *Global Environmental Change* 23: 1605–1614. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.09.007>
- Hecht, Susana B. 1993. The logic of livestock and deforestation in Amazonia. *BioScience* 43(1): 687–695. <https://doi.org/10.2307/1312340>
- Kastner, Thomas, María José Ibarrola-Rivas, Wolfgang Koch & Sanderini Nonhebel. (2012). Global changes in diets and the consequences for land requirements for food. *Proceedings of National Academy of Sciences* 109(18): 6868–6872.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1117054109>
- Makkar, Harinder P.S. 2018. Review: Feed demand landscape and implications of food-not feed strategy for food security and climate change. *Animal* 12(8): 1744–1754.
<https://doi.org/10.1017/S175173111700324X>
- Mas, Jean-François, Alejandro Velázquez, José Reyes Díaz-Gallegos, Rafael Mayorga-Saucedo, Camilo Alcántara, Gerardo Bocco, Rutilio Castro, Tania Fernández & Azucena Pérez-Vega. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multivariate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth*

Observation and Geoinformation 5, 249–261.

<https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.06.002>

Mendoza-Ponce, Alma, Rogelio Corona-Núñez, Florian Kraxner, Sylvian Leduc & Piera Patrizio. (2018). Identifying effects of land use cover changes and climate change on terrestrial ecosystems and carbon stocks in Mexico. *Global Environmental Change* 53: 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.004>

Mendoza-Ponce, Alma, Rogelio Corona-Núñez, Leopoldo Galicia & Florian Kraxner, F. (2019). Identifying hotspots of land use cover change under socioeconomic and climate change scenarios in Mexico. *Ambio* 48: 336–349.

<https://doi.org/10.1007/s13280-018-1085-0>

Moreno-Unda, Araceli A. (2011). Efectos ambientales del Programa Nacional de Desmontes, México 1972–1982. Tesis de maestría en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí / Universidad de Ciencias Aplicadas de Colonia.

Mottet, Anne, Cees de Hann, Alessandra Falcucci, Giuseppe Tempio, Carolyn Opio & Pierre Gerber. (2017). Livestock: on our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/ food debate. *Global Food Security* 14: 1–104.

<https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.001>

Muscat, Abigail, Evelien de Olde, de Boer, Imke J.M. & Raimon Ripoll-Bosch. (2019). The battle for biomass: A systematic review of food-feed-fuel competition. *Global Food Security* [100330] <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100330>

Myers, Norman. (1981). The hamburger connection: how Central America's forests become North America's hamburgers. *Ambio* 10(1): 3–8.

Naylor, Rosamond, Henning Steinfeld, Walter Falcon, James Galloway, Vaclav Smil, Eric Bradford, Jackie Alder & Harold Mooney. (2005). Losing the links between livestock and land. *Science* 310, 1621–1622.

<https://doi.org/10.1126/science.1117856>

Pérez-Espejo, Rosario. (1988). De la ganaderización de la agricultura a la desganaderización actual. Retos y perspectivas. *Momento Económico* 38: 3–7.

- Poore, Joseph & Thomas Nemecek. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* 360 (6392): 987–992.
<https://doi.org/10.1126/science.aag0216>
- Paz-Pellat, Fernando, Víctor M. Romero-Benítez, Jesús A. Argumedo-Espinoza, Martín Bolaños-González, Ben de Jong, Julio Cruz-Cabrera & Alma Velázquez-Rodríguez. (2019). Dinámica del uso del suelo y vegetación. Capítulo 23. En: (XXXX, EDS.). *Ecosistemas terrestres. Programa mexicano del carbono*. Pp. 529–572.
https://www.researchgate.net/publication/333907848_Capitulo_23_DINAMICA_DEL_USO_DEL_SUELO_Y_VEGETACION
- Ran, Ylva, Corina E. van Middelaar, Mats Lannerstad, Mario Herrero & Imke J.M. de Boer (2017). Freshwater use in livestock production—to be used for food crops or livestock feed? *Agricultural Systems* 155: 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.03.008>
- SAGARPA. (2018a). Sistema Integral de Información Agroalimentaria y Pesquera, Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON), 1980–2017.
<https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>. Acceso 10 de junio 2018.
- SAGARPA. (2018b). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Producción Pecuaria 1980–2017. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-pecuaria> Acceso 3 de junio 2018
- Tello-Carrasco, José A., Pedro P. Garcillán & Exequiel Ezcurra. *En prensa*. How dietary transition changed land use in Mexico. *Ambio*.
- Thornton, Philip K. (2010). Livestock production: recent trends, future prospects. *Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences* 365: 2853–2867. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0134>
- Villafuerte-Solís, Daniel & José Luis Pontigo-Sánchez. (1990). Las contradicciones de la expansión ganadera en las fronteras norte y sur de México (Estados de Sonora y Chiapas). *Estudios Fronterizos* 21: 113–135.

Anexo 1. Relación de cultivos de SAGARPA (2018a) considerados en este estudio como cultivos de consumo animal (i.e., forrajes).

- Alfalfa achicalada
- Alfalfa verde
- Alpiste
- Alpiste verde
- Avena forrajera achicalada
- Avena forrajera en verde
- Avena forrajera seca
- Canola forrajera
- Cártamo forrajero en verde
- Caña de azúcar forrajera
- Cebada forrajera achicalada
- Cebada forrajera en verde
- Cebada forrajera seca
- Centeno forrajero achicalado
- Centeno forrajero en verde
- Centeno forrajero seco
- Clyptoria
- Coquia
- Ebo (janamargo o veza)
- Ebo (janamargo o veza) grano
- Ebo (janamargo o veza) seco
- Frijol forrajero
- Garbanzo forrajero
- Girasol forrajero
- Leucaena
- Maguey forrajero
- Maíz amarillo
- Maíz forrajero achicalado
- Maíz forrajero en verde
- Maíz forrajero seco
- Mijo forrajero
- Mijo forrajero verde
- Mostaza forrajera
- Nabo forrajero
- Nopal forrajero
- Pastos y praderas
- Pastos y praderas achicalado
- Pastos y praderas seco
- Remolacha forrajera
- Sorgo forrajero achicalado
- Sorgo forrajero en verde
- Sorgo forrajero seco
- Sorgo grano
- Trébol
- Trigo forrajero achicalado
- Trigo forrajero seco
- Trigo forrajero verde
- Triticale forrajero achicalado
- Triticale forrajero en verde
- Triticale forrajero seco
- Zempoalxochitl forrajero
-