

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

**IMPACTOS AMBIENTAL Y ECONÓMICO DEBIDO A LA HUELLA HÍDRICA Y DE CARBONO
DEL SISTEMA BOVINO DE ENGORDA EN LA COMARCA LAGUNERA, MÉXICO**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL DOBLE GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE DE ZONAS ÁRIDAS

(UACH-URUZA, MÉXICO)

MÁSTER EN CAMBIO GLOBAL:

RECURSOS NATURALES Y SOSTENIBILIDAD

(UCO-IDEP, ESPAÑA)

PRESENTA:

CAYETANO NAVARRETE MOLINA

DIRECTOR:

Dr. CÉSAR ALBERTO MEZA HERRERA



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Bermejillo, Durango, México, Enero 2016

**IMPACTOS AMBIENTAL Y ECONÓMICO DEBIDO A LA HUELLA HÍDRICA Y DE CARBONO
DEL SISTEMA BOVINO DE ENGORDA EN LA COMARCA LAGUNERA, MÉXICO**

Tesis realizada por **CAYETANO NAVARRETE MOLINA** bajo la Dirección del Comité Asesor,
aprobada y aceptada como requisito para obtener el grado de:

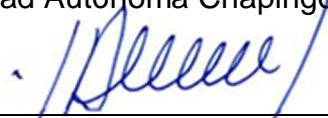
**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y
MEDIO AMBIENTE DE ZONAS ÁRIDAS**

Director



Dr. Cesar Alberto Meza-Herrera
Universidad Autónoma Chapingo. México

Asesor



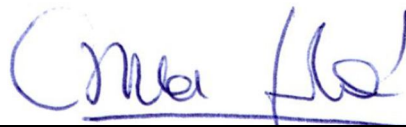
Dr. Miguel Ángel Herrera-Machuca
Universidad de Córdoba. España

Asesor



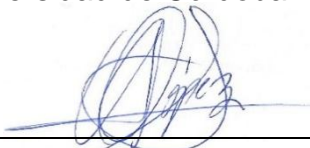
Dr. Francisco Gerardo Veliz-Deras
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México

Asesor



Dra. Carmen Galán-Solvedilla
Universidad de Córdoba. España

Asesor



Dr. Marco Andrés López-Santiago
Universidad Autónoma Chapingo. México

Enero 2016

Se hace patente un reconocimiento al apoyo recibido para el apoyo de la presente investigación:

Al Programa de Becas Nacionales CONACYT 2014 - 2015.

Al Programa de Becas Mixtas en el Extranjero, para Becarios CONACYT Nacionales 2014 - 2015.

Programa de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas 2014 - 2015 (UACH-URUZA).

Programa de Máster en Cambio Global: Recursos Naturales y Sostenibilidad 2014 – 2015 (UCO).

Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo.

Instituto de Estudios de Posgrado de la Universidad de Córdoba, España (IDEP-UCO)

DATOS BIOGRÁFICOS

El C. Cayetano Navarrete Molina, es originario de Los Ángeles, Rodeo, Durango, México. Estudió la preparatoria en el Centro de Bachillerato Tecnológico agropecuario No. 172 en Rodeo, Durango, México. Es Ingeniero Agrónomo Especialista en Sistemas Pecuarios de Zonas Áridas por la Universidad Autónoma Chapingo, egresado en el año 2001. Obtuvo el grado de licenciatura con la tesis titulada “Efectos de la composición del hato, rendimientos físicos y precios reales en la productividad monetaria por animal en el sector lechero en el municipio de Gómez Palacio, Durango de 1990 a 2002” en 2005, dirigida por el Dr. José Luis Ríos Flores.

Su línea de investigación se relaciona al impacto ambiental de la ganadería con el proyecto “Impactos ambiental y económico debido a la huella hídrica y de carbono del sistema bovino de engorda en la Comarca Lagunera, México” por medio del cual logró terminar la presente tesis bajo la dirección de su tutor y asesor Dr. César Alberto Meza Herrera.

Participó en una estancia para una doble titulación en el periodo de Enero a Junio de 2015 en la Universidad de Córdoba, España, en el Máster “Cambio Global: Recursos Naturales y Sostenibilidad” a cargo del Dr. Miguel Ángel Herrera Machuca, con el apoyo del programa de Becas Mixtas del CONACYT para programas de doble titulación.

Impactos ambiental y económico debido a la huella hídrica y de carbono del sistema bovino de engorda en la Comarca Lagunera, México

Environmental and economic impacts due to the water and carbon footprints of the feedlot beef cattle system in Comarca Lagunera, Mexico

Navarrete-Molina, Cayetano¹, Meza-Herrera Cesar Alberto²

RESUMEN

La población mundial se ha incrementado a 7,244 millones de personas, un escenario que sugiere aumentos en la demanda y consumo de productos de origen animal paralelo a una mayor presión en el uso de los recursos hídricos y aumentos en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). El objetivo del presente estudio fue cuantificar el impacto de la huella hídrica (HH) y la emisión de GEI como indicadores de sustentabilidad del sistema de engorda del bovino de carne (SBC). El estudio se realizó en el norte de México, en la Comarca Lagunera (CL; 102° 22' & 104° 47' LO, 24° 22' & 26° 23' LN), siendo esta una región árida, con promedios anuales de precipitación menores a 240 mm, aunque muy importante en producción de carne bovina en el país. La cuantificación del impacto ambiental de la HH consideró el cálculo del uso de agua verde, azul y gris por SBC. La huella de carbono (HC) consideró la metodología del IPCC para las subcategorías ganadería y agricultura. El cálculo del valor económico (VE) de HH consideró el precio promedio internacional del agua y para la HC consideró el precio promedio de los bonos de carbono. El valor económico del SBC se determinó con base al valor bruto de la producción (VBP) en la CL. En 2014, la CL registró un inventario de bovinos de carne de 154,670 animales, 374,522 animales sacrificados y una producción de 61,724 toneladas de carne. Al contrastar el VBP-SBC de \$ 1,878.8 millones (€ 107.4 millones) respecto al VE-HH de \$ 48,686.5 millones (€ 2,782.1 millones) sumado al VE-HC de \$ 1,344.1 millones (€ 76.9 millones), se observa un significativo impacto ambiental y económico del SBC. En efecto, el VBP-SBC representa únicamente el 3.8% del VE de HH y HC [\$ 50,030.6 millones (€ 2,859 millones)]. Por lo anterior, es imperativo delinear y adoptar estrategias de mitigación en el manejo del SBC con respecto al uso del agua y emisiones de GEI. Dicha estrategia será fundamental para lograr la sustentabilidad no solo del SBC, sino viabilidad ecológica, económica y social de la propia Comarca Lagunera.

Palabras clave: bovinos de carne; gases de efecto invernadero; huella hídrica; impacto ambiental y económico

¹Tesista

²Director

ABSTRACT

The world's population has increased to 7.2 billion, a scenario that suggests increases in the demand and consumption of animal products, as well as greater pressure on the use of water resources and higher greenhouse gas (GHG) emissions. This study aimed to quantify the impact of the water footprint (WF) and GHG emissions as markers of the sustainability of the beef cattle feedlot system (BCS). The study was carried out in northern Mexico, in the Comarca Lagunera (CL; 102° 22' & 104° 47' WL, 24° 22' & 26° 23' NL). This arid region, with average annual precipitation of less than 240 mm, is very important in the production of beef cattle in the country. Quantification of the environmental impact of the WF considered the use of green, blue and gray water by the BCS. In addition, the carbon footprint (CF) considered the methodology proposed by the IPCC for the livestock and agriculture subcategories. To calculate the WF-economic value (EV), an average international price of water was considered, while the CF-EV included the average global price of carbon credits. The economic value of the BCS was determined according to the gross production value (GPV) recorded in the CL. In 2014, the CL had a beef cattle feedlot inventory of 154,670 animals, 374,522 slaughtered animals and a production of 61,724 tons of meat. When contrasting the BCS-GPV \$ 1,878.8 million (€ 107.4 million) against the EV-WF \$ 48,686.5 million (€ 2,782.1 million) plus EV-CF \$ 1,344.1 million (€ 76.9 million), not only an extensive environmental but also significant economic impact is observed. Certainly, the BCS-GPV only represents 3.8% of the added WF + CF EV [\$ 50,030.6 million (€ 2,859 million)]. Therefore, when considering the water footprint and the GHG emissions of the BCS, it is imperative to delineate and to adopt mitigation strategies regarding the BCS-management. This strategy is key to achieving the sustainability not only of the BCS but also the ecological, economic and social viability of the CL itself.

Keywords: beef cattle; greenhouse gases; water footprint; environmental and economic impact

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	v
ABSTRACT	v
I Introducción	1
1.1. Antecedentes	4
1.2. Objetivos	6
1.3 Hipótesis	6
1.4 Revisión de literatura	7
1.4.1. Huella hídrica de la producción de carne de bovino	7
1.4.2. El ganado bovino y el efecto invernadero	8
1.4.3. Huella de carbono	9
1.4.4. Estándares utilizados en la medición de la huella de carbono	11
II Materiales y métodos	13
2.1. Huella hídrica	14
2.2. Huella de carbono	14
2.2.1. Subcategoría Ganadería	14
2.2.2. Subcategoría Agricultura	17
2.3. Base de datos a utilizar para los cálculos	19
III Resultados y Discusión	23
3.1. Huella hídrica	23
3.2. Emisiones directas de GEI	24
3.3. Emisiones indirectas de GEI	29
IV Conclusiones	36
V Literatura citada	38

ÍNDICE DE FIGURAS

No.	Título	Pág.
1	Huella hídrica de la producción de carne de distintas especies	2
2	Emisiones globales de GEI del sector pecuario	3
3	Ubicación de la Comarca Lagunera	13
4	Inventario de bovinos de carne del 2001–2014 en la Comarca Lagunera, México.	20
5	Bovinos de carne sacrificados del 2001–2014 en la Comarca Lagunera, México.	20
6	Huella hídrica del sistema de producción de bovino carne del 2001–2014 en la Comarca Lagunera, México.	23
7	Emisiones de GEI equivalentes de CO ₂ del ganado bovino carne del 2001–2014 en la Comarca Lagunera, México.	25
8	Participación de emisiones equivalentes de CO ₂ del metano y óxido nítrico del ganado bovino carne en la Comarca Lagunera	28
9	Emisiones equivalentes de CO ₂ de cultivos forrajeros utilizados para alimentar el ganado bovino carne en la Comarca Lagunera	30
10	Participación de la agricultura (forrajes) y la ganadería en la emisión de GEI del ganado bovino carne del 2001–2014 en la Comarca Lagunera, México.	31
11	Comparativo del valor de la producción y el costo de las emisiones del ganado bovino de carne del 2001–2014 en la Comarca Lagunera, México.	32
12	Comparativo de los costos ambientales y el valor de la producción del ganado bovino de carne en la Comarca Lagunera	33

ÍNDICE DE CUADROS

No.	Título	Pág.
1	Inventario y animales sacrificados de bovinos de carne del 2001-2014 en la Comarca Lagunera, México	21
2	Volumen y valor de la producción de carne de bovino del 2001–2014 en la Comarca Lagunera, México.	21
3	Constantes de extracción de nitrógeno por tonelada de producto cosechado y contenido de humedad a la cosecha	22
4	Emisiones de metano (Gg) y su equivalencia en CO ₂ del ganado bovino carne en la Comarca Lagunera 2001 - 2014	26
5	Emisiones de N ₂ O y sus equivalencias en CO ₂ del ganado bovino carne en la Comarca Lagunera 2001 - 2014	28
6	Volumen y costo de las emisiones del ganado bovino de carne en la Comarca Lagunera 2001 - 2014	32

I Introducción

Durante el último siglo, la población mundial se ha cuadruplicado y el consumo de los recursos globales ha crecido hasta un punto en que ahora se utilizan los recursos naturales a un ritmo más intenso del que la tierra puede regenerarlos (Wackernagel *et al.*, 2002). El incremento en los niveles de vida genera una mayor demanda y por lo tanto mayor producción de alimentos de origen animal, lo que ha llevado a dedicar cada vez más áreas a ésta actividad en un constante cambio de uso del suelo (Cardoso, 2012).

Las tendencias de la dinámica demográfica y los patrones de consumo, junto con la amenaza del cambio climático y la degradación irreversible de los servicios ecosistémicos, conducen a una mayor incertidumbre con respecto a los modelos de producción de alimentos actuales (Kumar *et al.*, 2011). El sector ganadero será un importante contribuyente a los problemas ambientales a cada nivel –regional y global- incluyendo degradación del suelo, cambio climático, contaminación del aire, escasez y contaminación del agua, y pérdidas de biodiversidad (SCOPE, 2010).

El aumento previsto en la producción y consumo de productos animales podría poner más presión sobre los recursos de agua dulce del mundo. El tamaño y características de la huella hídrica (HH) varían en los tipos animales y sistemas de producción (Mekonnen y Hoekstra, 2010) (Figura 1). Además de lo anterior, se ha ocasionado que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) hayan crecido un 29% en el periodo 1995-2007 (Arto *et al.*, 2012).

La huella hídrica de una nación, empresa o producto es un indicador empírico de cuánta agua es consumida, cuándo y dónde, medida sobre la cadena de suministro completa. Es un indicador multidimensional, mostrando volúmenes pero también especificando el tipo de agua usada –agua de lluvia, agua superficial o contaminación del agua– y el lugar y momento de uso del agua (AgroDer, 2012).

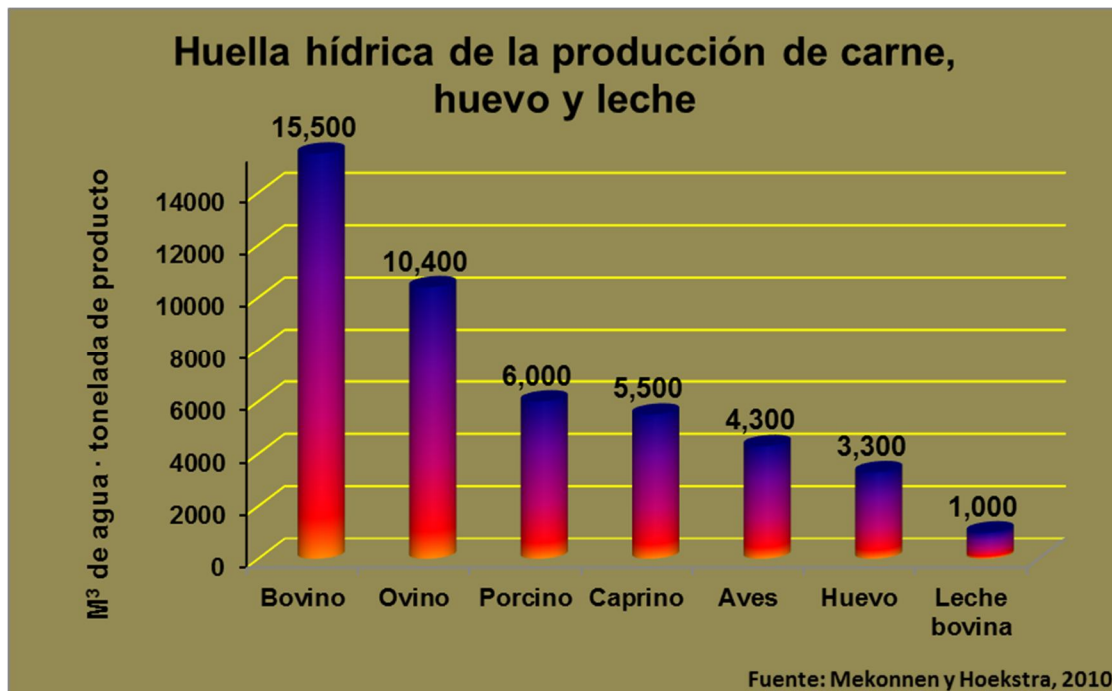


Figura 1. Huella hídrica de la producción de carne de distintas especies

A nivel mundial, el 2014 fue el año más cálido (desde 1880) y las temperaturas son ahora 0.8 °C más altas que los niveles preindustriales. El mercado del carbono es una pieza esencial para lograr la descarbonización del planeta (Kossov *et al.*, 2015). Los mismos autores reportan que en 2014 la tendencia en el intercambio de bonos de carbono entre países fue de alrededor de 32 mil millones de dólares americanos.

Los gases que contribuyen al efecto invernadero incluyen el dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄), ozono (O₃), vapor de agua y los clorofluorocarbonos (CFCs). Varios científicos han opinado que la concentración de GEI en la atmósfera se ha incrementado, y lo sigue haciendo, marcadamente durante los pasados 250 años, desde el inicio de la revolución industrial y el incremento en el uso de combustibles fósiles (Chukwuocha *et al.*, 2010).

El cambio climático, provocado por la emisión de GEI y en especial del CO₂, es uno de los principales problemas globales de nuestro tiempo y existen

evidencias considerables de que la mayor parte del calentamiento global ha sido causado por las actividades humanas o antropogénicas. Hoy día, casi todas las actividades que realizamos (transporte, alimentación, actividades agropecuarias, etc.) y bienes que poseemos y utilizamos (bienes de consumo, vehículos, electrodomésticos, etc.) implican consumir energía, lo que significa contribuir a las emisiones a la atmósfera (Schneider, 2010).

La medición de la sustentabilidad de la huella de carbono (HC) de una actividad crea verdaderos beneficios para la sociedad. La huella de carbono identifica las fuentes de emisiones de GEI de un producto o actividad. Con esto permite definir mejores objetivos, políticas de reducción de emisiones más efectivas e iniciativas de ahorros de costos mejor dirigidas, todo ello por consecuencia de un mejor conocimiento de los puntos críticos para la reducción de emisiones, que pueden o no ser de responsabilidad directa de la actividad analizada (Hermansen y Kristensen, 2011). En la figura 2 se muestran las emisiones globales de CO₂ debido a la producción de carne de distintas especies.

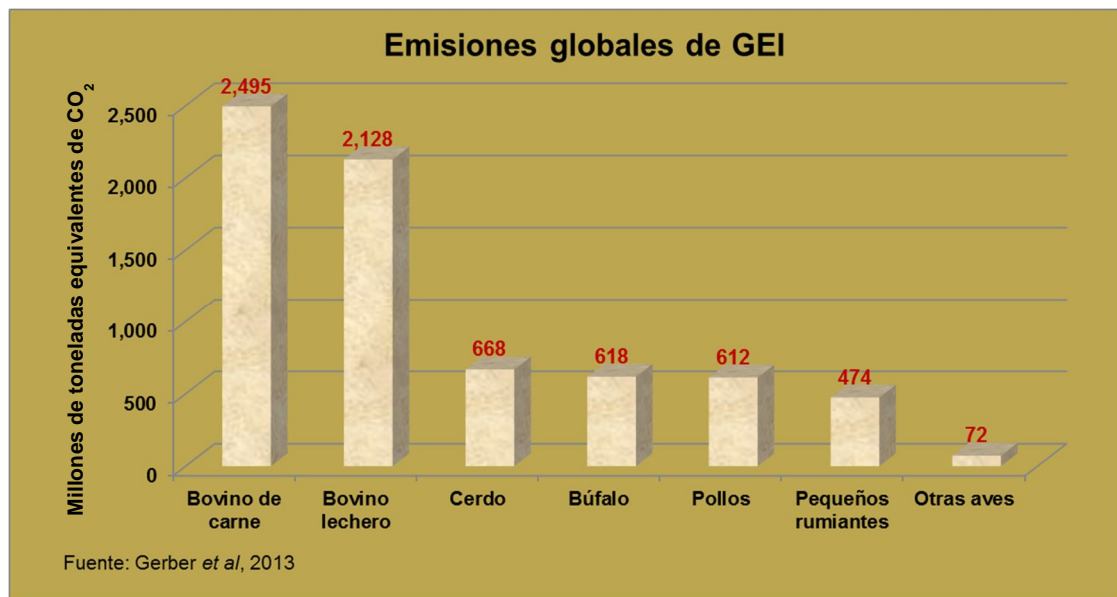


Figura 2. Emisiones globales de GEI del sector pecuario

1.1. Antecedentes

La población mundial crecerá de 7,244 millones actualmente a 9,551 millones en 2050 (ONU, 2014). El incremento de la población, de los ingresos y la urbanización se combinan para plantear desafíos sin precedentes a la agricultura y la producción de alimentos, mientras que los recursos naturales necesarios para la producción y prestación de servicios son limitados y sin crecimiento. Impulsadas por la fuerte demanda de una clase media global emergente, las dietas serán más ricas y diversificadas, y el crecimiento en la demanda de alimentos de origen animal será particularmente fuerte; la demanda de carne y leche en 2050 se proyecta a crecer por 73 y 58 por ciento, respectivamente, respecto a sus niveles en 2010 (FAO, 2011).

En febrero de 2014, el Secretario de Energía de México anunció el potencial de desarrollo de un mercado de carbono en el sector de la energía. El país se comprometió a una reducción incondicional de 25% de las emisiones de GEI y contaminantes de breve duración para el año 2030. México también tiene un objetivo condicional de reducir las emisiones de éstas últimas hasta 40% en 2030, todo como parte de una política nacional contra el cambio climático, que incluye un impuesto a las emisiones de carbono de los combustibles fósiles (Kossoy *et al.*, 2015)

Mientras tanto, la cantidad de cabezas de ganado bovino carne explotadas o sacrificadas en la Comarca Lagunera ascendió a 374,522 en 2014, lo que representó una producción de 61,724 toneladas de carne con un valor en el mercado de 1,878.83 millones de pesos (SIAP, 2014).

En la Comarca Lagunera (CL) la explotación del ganado bovino para carne es intensiva o en corral, se desarrolla el tipo de ganadería que se ubica principalmente sobre extensiones comparativamente reducidas pero bien irrigadas, con una producción moderna y de carácter industrial. La infraestructura disponible se caracteriza por contar con corrales de manejo bien

diseñados además de que en este tipo de explotaciones mecanizadas la mano de obra utilizada es mínima, adquiriendo el producto un alto valor agregado por el nivel de calidad que se obtiene en estos procesos (SAGARPA, 2006).

1.2. Objetivos

Comparar el costo económico de la huella hídrica y de carbono con los beneficios económicos del sistema bovino de engorda en la Comarca Lagunera.

Determinar el impacto ambiental del sistema bovino de engorda en la Comarca Lagunera.

1.3. Hipótesis

El impacto ambiental del sistema bovino de engorda en la Comarca Lagunera es menor al beneficio económico generado por ésta, en la región.

1.4. Revisión de literatura

1.4.1. Huella hídrica de la producción de carne de bovino

La huella hídrica (HH), es un indicador del uso del agua que incluye tanto el uso de agua directo como indirecto de un consumidor o productor. Esta huella se mide en términos de volumen de agua consumida (evaporada o que no retorna) y/o contaminada por unidad de tiempo. La HH es un indicador geográfica y temporalmente explícito ya que explica el cuándo y cómo es que el agua se emplea. Puede ser calculada para una cadena o parte de un proceso, para un producto, para un consumidor, grupo de consumidores (i.e. municipio, provincia, estado o nación) o productor (i.e. un organismo público, empresa privada) (Hoekstra *et al.*, 2011).

El estudio de la HH contribuye al conocimiento de los flujos reales de agua a través de la producción y del consumo, permitiendo identificar el origen y destino, así como la forma en que es utilizada para satisfacer necesidades o generar riqueza. Complementándola con otras herramientas, brinda un panorama más amplio sobre el nivel de explotación del recurso en distintas latitudes del planeta. El análisis de la HH no debe ser interpretado como un elemento aislado: es una herramienta orientada a brindar información base que, siendo analizada en el contexto regional y junto con otros indicadores de relevancia, puede ser de utilidad para los tomadores de decisiones. Los otros factores a considerar son climáticos, hidrológicos y geográficos, así como los modelos productivos utilizados en las distintas regiones, la evolución demográfica local y los escenarios futuros (AgroDer, 2012).

La HH de un animal vivo se compone de diferentes elementos: la HH indirecta de la producción de alimento para ganado y la HH directa relacionada con el agua de bebida y servicio (Chapagain y Hoekstra, 2010). La HH de productos de origen animal pueden ser comprendidos a partir de tres factores principales: la eficiencia de conversión alimenticia del animal, composición de la

dieta, y el origen de los insumos. El tipo de sistema de producción (pastoreo, mixto, industrial) también es importante porque influye en los tres factores. Considerando la huella hídrica total por cada categoría de animales, se ha visto que el bovino de carne tiene la mayor contribución (33%) a la HH global de la producción de animales de granja, seguido de bovino lechero (19%), cerdos (19%) y pollos de engorde (11%) (Mekonnen y Hoekstra, 2012).

1.4.2. El ganado bovino y el efecto invernadero

Las emisiones mundiales de GEI causadas por actividades humanas han aumentado, desde la era preindustrial, en un 70% entre 1970 y 2004. En el mismo periodo, el aumento más importante de las emisiones de GEI proviene de los sectores de suministro de energía, transporte e industria, mientras que la vivienda y el comercio, la silvicultura (incluida la deforestación) y la agricultura han crecido más lentamente. El aumento mundial de las concentraciones de CO₂ se debe principalmente al uso de combustibles de origen fósil, con una aportación menor, aunque perceptible, de los cambios de uso de la tierra. Es muy probable que el aumento observado de la concentración de CH₄ se deba predominantemente a la agricultura y al uso de combustibles fósiles. El aumento de la concentración de N₂O se debe principalmente a las actividades agrícolas (IPCC, 2007).

Ha sido ampliamente reconocido que la producción y consumo de alimentos contribuye significativamente a las emisiones antropogénicas de GEI, siendo la ganadería la principal fuente de emisiones. Actualmente, se estima que el sector ganadero (incluyendo el cambio de uso del suelo) contribuye con el 18 % de las emisiones globales de GEI (Steinfeld *et al.*, 2006).

El futuro de la seguridad alimentaria y el suministro de energía son de preocupación importante. El ganado, principalmente los rumiantes, ocupan el 80% del uso antropogénico del suelo (Stehfest, 2009) y consumen alrededor del 35% de los cultivos agrícolas (Foley *et al.*, 2011), por lo que están en

competencia directa con la producción de cultivos para consumo humano, y con usos alternativos del suelo con gran potencial, tal como la producción de cultivos bioenergéticos y conservación de la naturaleza (Smith *et al.*, 2010).

1.4.3. Huella de carbono

Una huella de carbono se define como “la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto”. Tal impacto ambiental es medido llevando a cabo un inventario de emisiones de GEI siguiendo normativas internacionales reconocidas, tales como ISO 14064-1, PAS 2050 o GHG Protocol entre otras. La huella de carbono se mide en masa de CO₂ equivalente. Una vez conocido el tamaño y la huella, es posible implementar una estrategia de reducción y/o compensación de emisiones, a través de diferentes programas, públicos o privados (IPCC, 2003).

Para el IPCC, el término “cambio climático” denota un cambio en el estado del clima identificable, por ejemplo, mediante análisis estadísticos, a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. (IPCC, 2007). El calentamiento global genera un problema significativo, ya que la combustión de carbón, petróleo y otros de los combustibles fósiles promueve un incremento en la concentración atmosférica de gases como el dióxido de carbono. Esto da lugar a un incremento global de la temperatura del aire que conduce al cambio climático. Específicamente, el calentamiento global causará un aumento de los niveles del mar, los cambios en la lluvia patrones y otros dramáticos problemas ambientales (VijayaVenkataRaman *et al.*, 2011).

El debate sobre los costos de la mitigación de emisión de GEI se ha complicado recientemente y ha generado desacuerdos sobre la existencia de dividendos económicos y ambientales que se han añadido a las discusiones

sobre la existencia de un potencial costo negativo. Los países industrializados pueden reducir sus costos de la reducción de emisiones de carbono si sancionan no sólo el uso de combustibles fósiles, sino también la base de su exportación-importación (VijayaVenkataRaman *et al.*, 2011).

El sector ganadero es responsable del 18% del total de las emisiones de GEI, debido principalmente a la deforestación para establecer pastizales, cultivo de granos para la alimentación animal, fermentación del rumen y desechos ganaderos (Steinfeld *et al.*, 2006). Considerando únicamente al sector agropecuario, el ganado representa el 80% del total de las emisiones (Cardoso, 2012). Los sistemas ganaderos ocupan el 30% de la superficie terrestre libre de tundra del planeta (Steinfeld *et al.*, 2006). La producción de carne de aves de corral aparece como la más eficiente ambientalmente, seguido por la carne de cerdo y ovejas y finalmente la carne de vacuno, la cual es la menos eficiente (Williams *et al.*, 2006).

Los sistemas para la producción de diferentes tipos de ganado son muy diversos, lo que se traduce en grandes diferencias en las emisiones de GEI por kilogramo producido en diferentes regiones (Moran y Wall, 2011). Para la estimación de las emisiones de GEI se utilizan los factores e índices de emisión provistos por el IPCC (1997), y considerando el inventario de ganado, el nivel de producción, tipo de dietas, consumo y digestibilidad. Asimismo, el IPCC establece tasas de conversión de esas emisiones en equivalentes de potencial de calentamiento global de dióxido de carbono. Estas equivalencias corresponden a lo siguiente: una unidad de CH₄ = 23 unidades de CO₂ y una unidad de N₂O = 296 unidades de CO₂.

De igual manera, se ha establecido un precio internacional de las emisiones de carbono, lo cual permite calcular el impacto de dichas emisiones en lo económico, habiéndose proyectado el precio en 15.75 €/t de CO₂. (Environmental Finance, 2011; Thompson Reuters, 2011). Con éstos índices se pretende estimar el grado de sustentabilidad del ganado bovino de carne con

base en la huella de carbono en la Comarca Lagunera, ya que no se han encontrado trabajos similares realizados para la zona.

1.4.4. Estándares utilizados en la medición de la huella de carbono

Existe el mito que aún no están disponibles los estándares internacionales para medir o certificar la huella de carbono, o que el mercado internacional no se ha puesto de acuerdo en cuál estándar exigir a las empresas. Lo cierto, es que sí existen estándares internacionales, y ya hay empresas certificadas en éstos. Diferentes estándares se pueden agrupar dependiendo si la certificación corresponde a una organización o a un producto (IPCC, 2003):

Huella de carbono de una organización - abarca todos los sectores comerciales dentro de la organización: GHG Protocol, ISO 14064-1

Huella de carbono de productos - abarca las emisiones de gases de efecto invernadero de la organización y del ciclo de vida de los productos: PAS 2050 e ISO 14067.

El impacto ambiental del ganado es evaluado en términos de emisiones directas e indirectas de GEI. Las emisiones directas de metano (CH_4) conciernen a la fermentación entérica y excreción de estiércol, mientras que la orina es responsable de las emisiones de óxido nitroso (N_2O) (Jungbluth *et al.*, 2001). Está previsto en la metodología del IPCC (2003) que bajo el término, *estiércol*, se considera para efectos de cálculo excrementos sólidos o líquidos y orina; y para el cálculo de emisión de N_2O es fundamental determinar la cantidad de nitrógeno (N) por tipo o especie ganadera, los sistemas de manejo típico y los factores de emisión respectivos.

Las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) por medio de la respiración se consideran en balance con las especies vegetales que integran el CO_2 atmosférico en compuestos orgánicos y que son utilizados en la alimentación animal (Steinfeld *et al.*, 2006). Las emisiones indirectas no se derivan directamente del ganado pero dependen de las emisiones del estiércol, cultivo

de granos y forrajes para la alimentación animal y uso de fertilizantes, deforestación ligada a la crianza de ganado, desertificación y transportación (Mosier *et al.*, 1998).

Las emisiones de metano provenientes de diversas fuentes y sectores de la economía se encuentran dispersas a través del territorio. Éstas características complican la medición y caracterización lo cual genera cierta incertidumbre en las estimaciones y proyecciones de las emisiones (The White House, 2014).

La emisión de N_2O es variable, pues depende del volumen de estiércol producido por especie ganadera, la composición de las heces y la orina, del tipo de bacterias involucradas en el proceso y de la cantidad de oxígeno, y el sistema de manejo (Romanovskaya, 2008). Las emisiones de dióxido de carbono originadas por la expansión de los cultivos para alimentación y pastos en los hábitats naturales, son causadas por la oxidación del carbono en el suelo y la vegetación. También se originan del uso de los combustibles fósiles para la fabricación de fertilizantes, y el proceso de alimentación y el transporte del alimento. Las emisiones de N_2O provienen del uso de fertilizantes (orgánicos o sintéticos) para la producción de alimentos y de la deposición directa del estiércol en el campo (Gerber *et al.*, 2013).

II Materiales y métodos

La Comarca Lagunera, se localiza en la parte central de la porción norte de los Estados Unidos Mexicanos. Se encuentra ubicada entre los meridianos 102° 22' y 104° 47' longitud oeste, y los paralelos 24° 22' y 26° 23' latitud norte. La altitud media sobre el nivel mar es de 1,139 metros. Cuenta con una extensión montañosa y una superficie plana donde se localizan las áreas agrícolas, así como las áreas urbanas.

La región cuenta con una extensión total de 4,788,750 hectáreas, en las que se encuentran comprendidas las áreas montañosas, las agrícolas y pecuarias, así como las áreas urbanas. La superficie agrícola bajo la modalidad de riego representa el 3.62 por ciento de la extensión total, mientras que la superficie bajo la modalidad de temporal solo alcanza el 1.10 por ciento de dicha extensión. Cabe señalar que en la modalidad de riego se incluye tanto el riego por bombeo como de gravedad.

La Región Lagunera está conformada por 10 municipios del Estado de Durango y 5 del Estado de Coahuila (Figura No. 3).

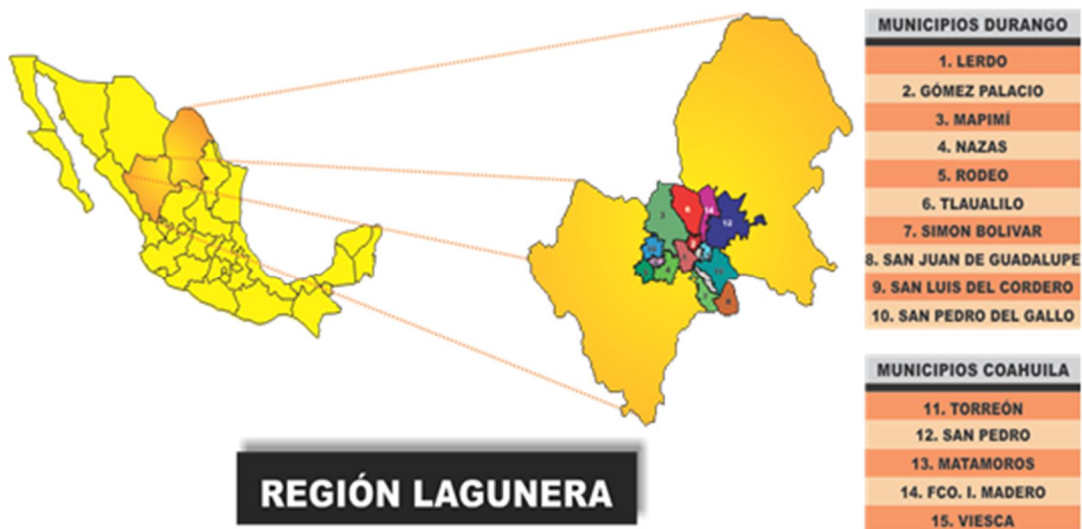


Figura 3: Ubicación de la Comarca Lagunera, (SAGARPA, 2010)

2.1. Huella hídrica

El consumo de agua se estimó con base en los estudios de huella hídrica en las categorías azul, verde y gris realizados por Mekonnen y Hoekstra (2012) para México en la producción de carne de bovino. La categoría utilizada fue la de producción de carne en canal fresca o congelada para un sistema de producción intensivo. Los factores de huella hídrica considerados son los siguientes: categoría verde: 12,339 m³, azul: 994 m³ y gris: 886 m³ de agua por tonelada de producto.

El precio internacional del agua consideró el promedio del precio de los principales países consumidores de agua de la Unión Europea, que es de 3.25 € por m³ de agua, los cuales fueron reportados por Kjellsson y Liu (2012).

2.2. Huella de carbono

De acuerdo a la técnica del cálculo de emisiones para CH₄ y N₂O, descrita en el manual de las buenas prácticas (IPCC, 2006) para la categoría agricultura se deben considerar tres subcategorías, a saber: ganadería, sabanas y agricultura; en este caso solo se incluyen el primero y el tercero, ya que los ambientes de sabana típicos para la cría de ganado bovino no aplican para la Comarca Lagunera.

2.2.1. Subcategoría Ganadería

El cálculo de emisión de CH₄ por fermentación entérica, típica de los procesos digestivos de los rumiantes, no obstante que el volumen de emisión depende del tipo, peso y edad del animal, el nivel de detalle para la caracterización de la población ganadera sólo implica el uso de los datos sobre el número de cabezas de bovinos carne.

De acuerdo a lo anterior, la ecuación para el cálculo de emisión de metano procedente de la fermentación entérica es la siguiente:

$$Em_{GFEC\text{H}_4} = \frac{POBG \times FE}{10^6 \text{ Kg} \cdot \text{Gg}^{-1}}$$

Dónde:

Em_{GFEC₄}: emisión de metano procedente de la fermentación entérica, en Gg de CH₄ por año;

POBG: número de animales o cabezas de ganado;

FE: factor de emisión correspondiente a una población específica de ganado.

Emisión de CH₄ por la producción de estiércol. De los dos niveles previstos en las directrices del IPCC para la estimación de las emisiones de CH₄ procedentes del estiércol del ganado, se aplicará el método de nivel 1, para el cual sólo se requiere contar con datos sobre la población de ganado.

De acuerdo con esto, la ecuación para el cálculo de emisión de metano originado por la producción de estiércol por especie ganadera es la siguiente:

$$Em_{mm} = \frac{FE \times POBG}{10^6 \text{ Kg} \cdot \text{Gg}^{-1}}$$

Dónde:

Em_{mm}: emisiones de CH₄ que se originan en la producción de estiércol para una población ganadera definida, en Gg/año;

FE: factor de emisión de N correspondiente a la población de ganado, en Kg·cabeza·año;

POBG: es el número de cabezas que integran la población ganadera.

Proceso de cálculo de emisiones de N₂O por manejo de estiércol. En esta sección se estimó el óxido nitroso producido durante el almacenamiento y tratamiento del estiércol, el cual incluye tanto las heces como la orina, sólidos y líquidos, producidos por el ganado bajo condiciones de manejo intensivo.

De acuerdo a lo anterior, la ecuación para el cálculo de emisión de óxido nitroso originado por el manejo de estiércol se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$(N_2O - N)_{(mm)} = \sum_{(s)} \left\{ \left[\sum N \times Nex \times SM_{(s)} \right] \times FE_{3(s)} \right\}$$

Dónde:

(N₂O-N)_(mm): emisiones de N₂O-N procedente del estiércol (Kg de N₂O-N/año);

N: número de cabezas de ganado;

N_{ex}: es la excreción media anual de N por cabeza de ganado en kg de N/animal/año;

SM_(s): es la fracción de la excreción total del ganado incluida en el sistema S de manejo del estiércol;

FE_{3(s)}: factor de emisión de N₂O para el sistema S de manejo del estiércol en Kg de N₂O-N·kg⁻¹ de N en el sistema S de manejo de estiércol;

S: sistema de manejo del estiércol.

La conversión de las emisiones de (N₂O-N)_(mm) en emisiones de N₂O_(mm) se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$N_2O_{(mm)} = (N_2O - N)_{(mm)} \times \frac{44}{28}$$

Actualmente se carece de información en relación a los factores de emisión locales. Los factores utilizados para la estimación de las emisiones de GEI fueron los sugeridos por el IPCC versión revisada para el año 1996 y recomendados para la región de América del Norte.

2.2.2. Subcategoría Agricultura

En esta subcategoría se estiman las emisiones directas de N₂O procedentes de los suelos agrícolas utilizados para la producción de forrajes que resultan de los aportes de N a los suelos, como fertilizantes sintéticos y orgánicos a base de estiércol de origen animal; además, se considera el cultivo de variedades fijadoras de N (F_{NB}).

La ecuación para el cálculo de las emisiones de óxido nitroso por el uso de fertilizantes sintéticos es la siguiente:

$$N_2O_{Directo} - N = [(F_{SN} + F_{EA} + F_{NB}F_{RC}) \times FE_1]$$

Dónde:

N₂O_{Directo} – N: emisión de N₂O en unidades de nitrógeno;

F_{SN}: cantidad anual de nitrógeno en los fertilizantes sintéticos aplicados a los suelos, ajustada para dar cuenta del volumen que se volatiliza como NH₃ y NO_x;

F_{EA}: cantidad anual de nitrógeno en el estiércol animal aplicado intencionalmente a los suelos, ajustada para dar cuenta del volumen que se volatiliza como NH₃ y NO_x;

F_{NB}: cantidad de nitrógeno fijado por los cultivos de la familia de las leguminosas (alfalfa) que se cultivan anualmente;

F_{RC} : cantidad de nitrógeno en los residuos de cosechas que se reintegran anualmente a los suelos.

La conversión de las emisiones de $(N_2O-N)_{(mm)}$ en emisiones de $N_2O_{(mm)}$ se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$N_2O_{(mm)} = (N_2O - N)_{(mm)} \times \frac{44}{28}$$

Para aplicar la ecuación anterior, las cantidades de los distintos aportes de N se calculan como a continuación se indica:

Nitrógeno de fertilizante sintético, ajustado por volatilización, F_{SN} :

$$F_{SN} = N_{FERT} \times (1 - Frac_{GASF})$$

Dónde:

N_{FERT} : cantidad total de fertilizante sintético consumido anualmente;

$Frac_{GASF}$: fracción del fertilizante que se volatiliza como NH_3 y NO_x .

Nitrógeno fijado por cultivos de la familia de las leguminosas (alfalfa), F_{BF} , expresado mediante la siguiente ecuación:

$$F_{BF} = 2 \times Cultivo_{BF} \times Frac_{NCRBF}$$

Dónde:

$Cultivo_{BF}$: cantidad de N fijado, y se estima al multiplicar el rendimiento por 2;

$Frac_{NCRBF}$: fracción de biomasa del cultivo constituida por nitrógeno.

Para la estimación de las cantidades de fertilizante nitrogenado utilizado se utilizó el nivel de extracción de nitrógeno del suelo por los diferentes cultivos forrajeros en la Comarca Lagunera considerando los estudios realizados por López Calderón *et al.*, (2013). El valor económico de las emisiones se calcularán tomando en cuenta el valor del mercado internacional del carbono ambiental, cuyo precio para el 2012 se fijó en 15.75 € por tonelada (Environmental Finance, 2011).

2.3. Base de datos a utilizar para los cálculos

Para realizar las estimaciones de emisiones de GEI en las subcategorías agricultura y ganadería, se utilizó la información publicada en los anuarios estadísticos de la producción agropecuaria de los años 2001 a 2014, publicados por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) para la Región Lagunera de los estados de Coahuila y Durango (Figuras 4 y 5).

La integración del anuario estadístico es el resultado del trabajo conjunto de las Subdelegaciones Agropecuaria y de Planeación y Desarrollo Rural; así como del esfuerzo realizado por el personal de los Distritos de Desarrollo Rural en el acopio y sistematización de la información, a través de los instrumentos del Sistema de Información Agropecuaria (SIACAP y SIPCAP), desde los Centros de Apoyo al Desarrollo Rural (CADER), hasta su agregación a nivel distrital y regional (Cuadros 1 y 2).

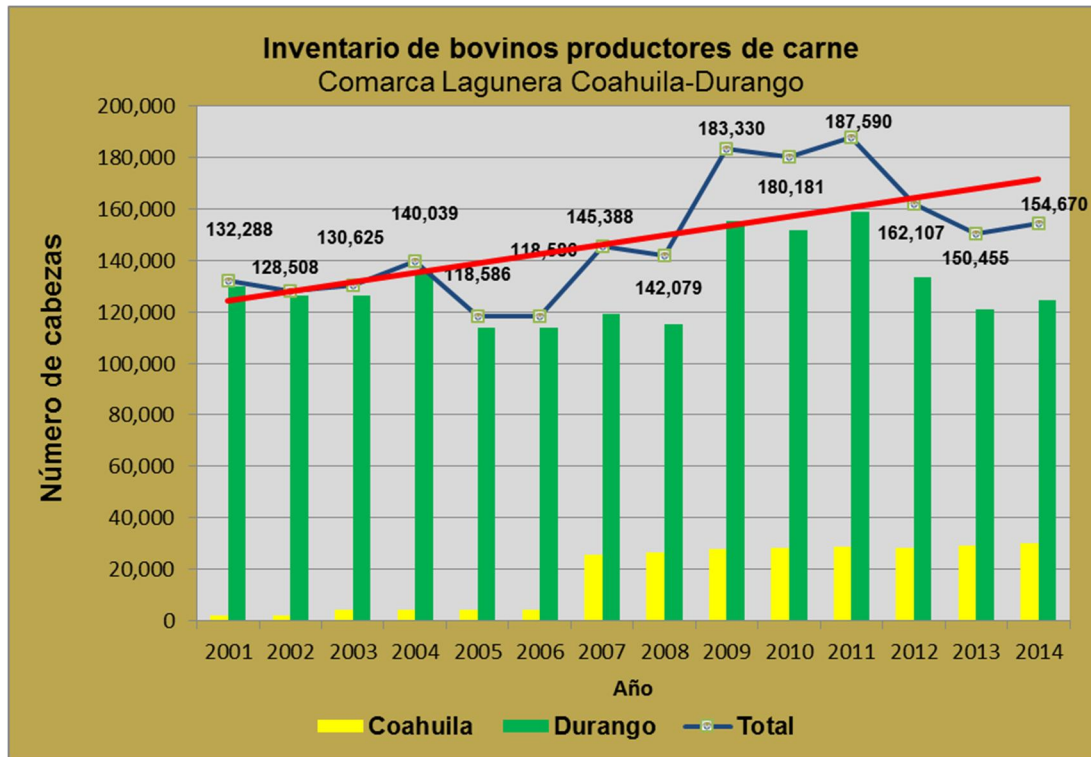


Figura 4. Inventario de bovinos de carne del 2001–2014 en la Comarca Lagunera, México.

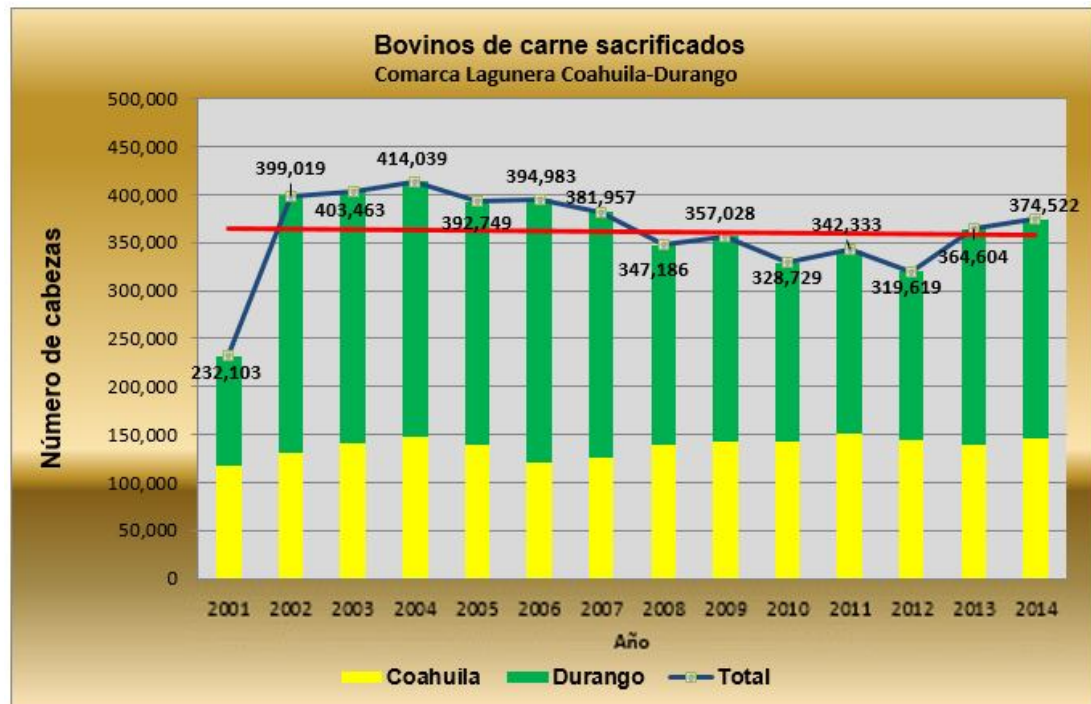


Figura 5. Bovinos de carne sacrificados del 2001–2014 en la Comarca Lagunera, México.

Cuadro 1. Inventario y animales sacrificados de bovinos de carne del 2001-2014 en la Comarca Lagunera, México

Año	Inventario (cabezas)			Animales sacrificados o explotados (cabezas)		
	Coahuila	Durango	Total	Coahuila	Durango	Total
2001	2,045	130,243	132,288	117,506	114,597	232,103
2002	2,147	126,361	128,508	130,487	268,532	399,019
2003	4,263	126,362	130,625	141,564	261,899	403,463
2004	4,263	135,776	140,039	147,098	266,941	414,039
2005	4,315	114,271	118,586	139,447	253,302	392,749
2006	4,315	114,271	118,586	120,971	274,012	394,983
2007	25,843	119,545	145,388	126,354	255,603	381,957
2008	26,698	115,381	142,079	139,042	208,144	347,186
2009	27,945	155,385	183,330	142,443	214,585	357,028
2010	28,438	151,743	180,181	143,275	185,454	328,729
2011	28,845	158,745	187,590	151,187	191,146	342,333
2012	28,462	133,645	162,107	143,921	175,698	319,619
2013	29,429	121,026	150,455	139,567	225,037	364,604
2014	30,021	124,649	154,670	146,217	228,305	374,522

Cuadro 2. Volumen y valor de la producción de carne de bovino del 2001–2014 en la Comarca Lagunera, México.

Año	Volumen de producción (toneladas)			Valor de la producción (miles de \$)		
	Coahuila	Durango	Total	Coahuila	Durango	Total
2001	19,739	25,706	45,446	427,454	550,698	978,152
2002	22,535	26,954	49,489	471,379	550,697	1,022,076
2003	21,729	26,395	48,124	500,583	686,842	1,187,425
2004	22,815	26,336	49,151	574,195	724,777	1,298,972
2005	24,762	26,017	50,779	696,354	796,722	1,493,076
2006	26,709	26,750	53,459	697,689	772,639	1,470,328
2007	26,819	26,482	53,301	723,603	761,723	1,485,326
2008	30,949	24,401	55,349	831,419	660,832	1,492,251
2009	32,764	23,804	56,568	781,691	691,987	1,473,678
2010	32,374	23,125	55,498	853,883	714,380	1,568,263
2011	33,270	23,872	57,142	933,650	767,776	1,701,426
2012	31,520	22,147	53,667	891,007	576,234	1,467,241
2013	32,526	27,677	60,203	930,353	808,642	1,738,995
2014	33,441	28,283	61,724	990,426	888,406	1,878,832

El uso estimado de fertilizantes, presentados en el cuadro 3, por cada uno de los cultivos forrajeros se calculó de acuerdo a los datos de extracción de N según el volumen de producción, estimados por López Calderón *et al.*, (2013).

Cuadro 3. Constantes de extracción de nitrógeno por tonelada de producto cosechado y contenido de humedad a la cosecha

Cultivo	kg de N por tonelada de producto cosechado	Contenido de humedad en la cosecha
Alfalfa verde	50	
Avena forrajera	19.2	20%
Maíz forrajero	13.9	33%

III Resultados y Discusión

3.1. Huella hídrica

El consumo promedio estimado de agua para la producción de carne de bovino en la Comarca Lagunera para los años 2001 - 2014 fue de 761.6 millones de $\text{m}^3\cdot\text{año}^{-1}$, con un costo promedio de 43,317.7 millones de pesos mexicanos (€ 2,475.3 millones), el cual es casi 30 veces superior al promedio del valor de la producción de la carne que fue de 1,446.7 millones de pesos mexicanos (€ 82.7 millones) (Figura 6).

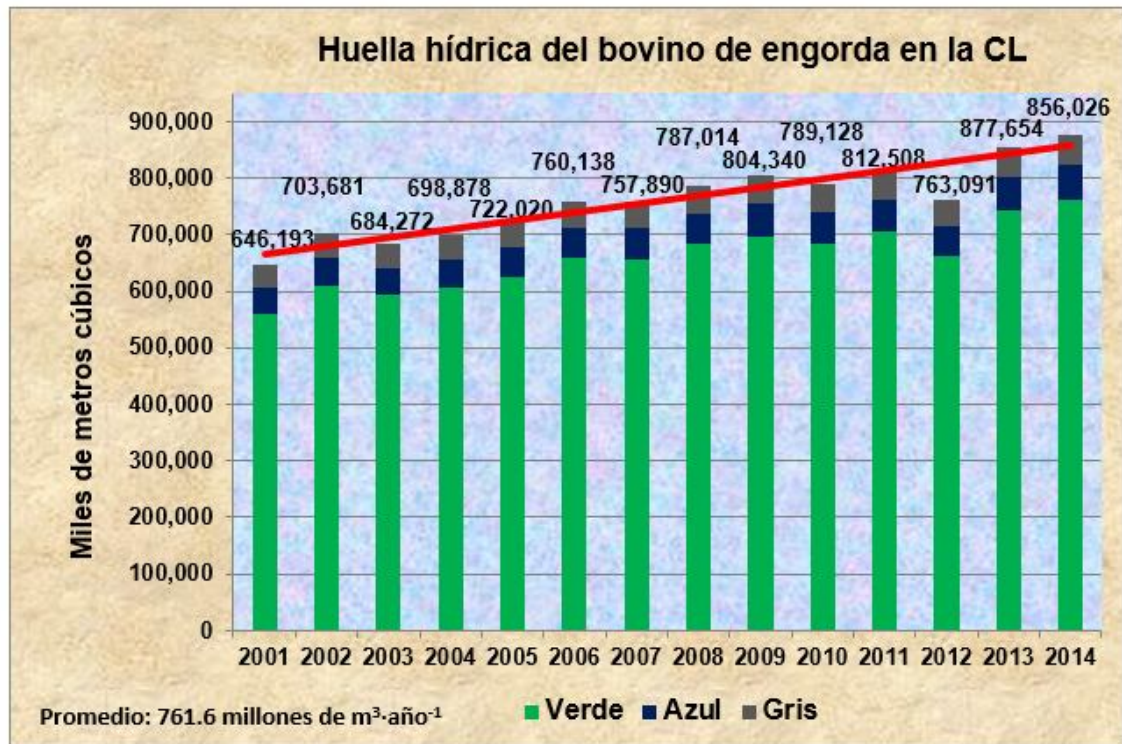


Figura 6. Huella hídrica del sistema de producción de bovino carne del 2001–2014 en la Comarca Lagunera, México.

Como mencionan Mekonnen y Hoekstra (2010), la HH de la producción de carne de bovino tan alta se debe a las grandes cantidades de alimento consumido por éste tipo de ganado por unidad de producto obtenido. A pesar

de que se necesita más volumen para alimentar a los rumiantes, su alimentación consiste en gran parte de forraje y otros materiales que los seres humanos no puede consumir, mientras que los no rumiantes consumen grandes cantidades de concentrado que se podría utilizar para consumo humano. Sin embargo, los rumiantes también compiten de manera indirecta con los humanos debido a la utilización de alimentos producidos en áreas que se podrían utilizar para cultivos de consumo humano.

La HH de la carne de bovino por unidad de producto es casi ocho veces mayor que la HH de la leche de bovino en la misma región, según lo calculado por Ramírez-Flores *et al.*, (2015), lo cual se explica principalmente por las diferencias en la eficiencia de la conversión alimenticia de cada una de las especies, acorde con lo mencionado por Mekonnen y Hoekstra (2010); además, éste valor concuerda con los resultados reportados por los mismos autores (Mekonnen y Hoekstra, 2012) que va de un rango de 8 hasta 16 veces.

Sin embargo; en la región, el sistema de producción de leche de vaca consume en total 5.3 veces más agua que el bovino de engorda. Las diferencias en la HH por unidad de producto radican en los volúmenes de producto generado, ya que por año una vaca lechera produce más de 4,000 litros, mientras que un bovino de engorda con un ciclo anual produce únicamente 250 kilogramos de carne, según los datos del SIAP (2015).

3.2. Emisiones directas de GEI

El total de emisiones directas de metano durante el periodo analizado fue de 28.0 Giga gramos (Gg, igual a mil toneladas), los cuales son equivalentes a 643,954 toneladas de CO₂ (Figura 7).

Del total de las emisiones de CH₄ (Cuadro 4) por la ganadería (643,954 t de CO₂e), el 96.4% (620,537 t de CO₂e) provienen de la fermentación entérica y el

restante 3.6% corresponde a las emisiones por manejo del estiércol (23,416 t de CO₂e).

La mayor parte de las emisiones directas de CH₄ provienen de la fermentación entérica (96.4%) y en menor importancia están las emisiones por el manejo del estiércol (3.6%), lo cual es similar al 81.7% y 18.3% respectivamente reportado para todo el sector ganadero en el Inventario Estatal de Emisiones de Gases de efecto invernadero de Durango 2005-2008 (2012) por el Gobierno del Estado de Durango. Las diferencias pueden deberse a lo específico de la especie aquí analizada.

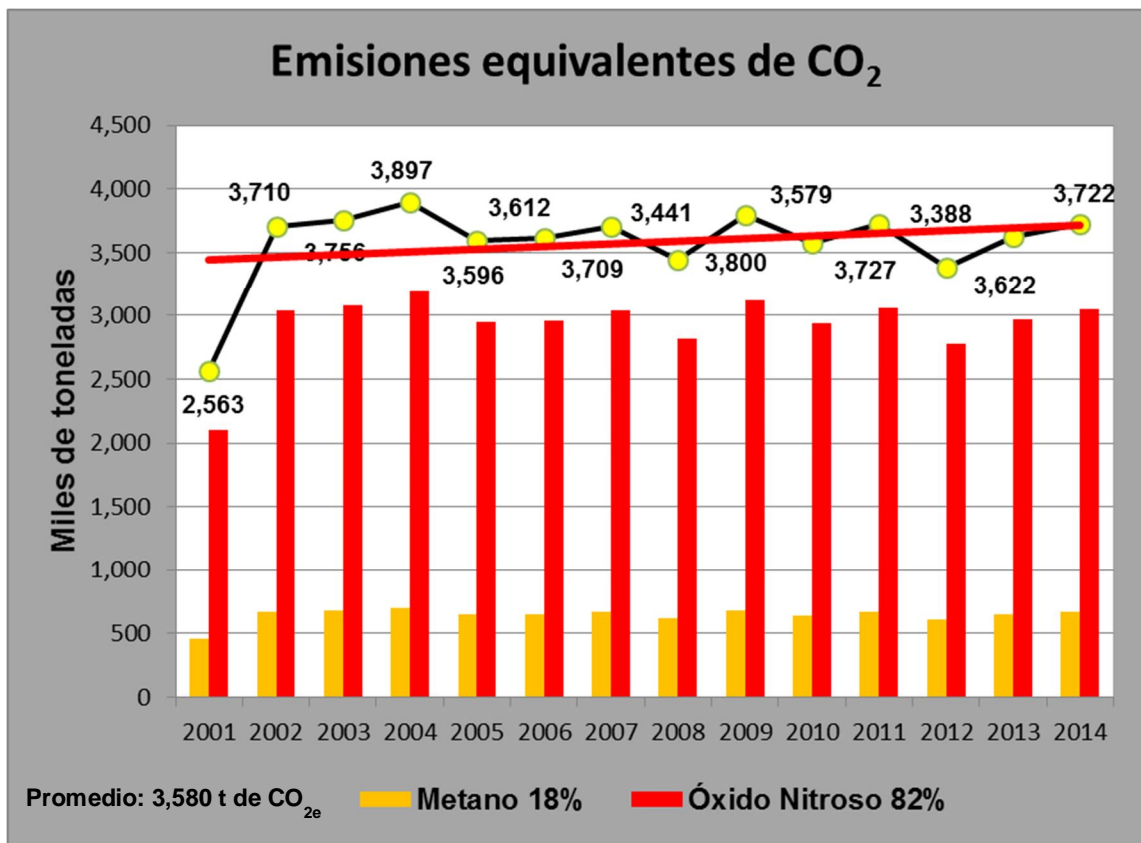


Figura 7. Emisiones de GEI equivalentes de CO₂ del ganado bovino carne del 2001–2014 en la Comarca Lagunera, México.

Las emisiones de CH₄ por individuo fueron de 150.7 gramos por día, valor que es congruente con los resultados reportados por Beauchemin y McGinn

(2005), que son de 62 a 171 gramos por día para ganado de engorda alimentado en corrales, dependiendo del tipo de dieta y estado productivo del animal. Debido a que las emisiones de GEI por fermentación entérica están directamente relacionadas con la digestibilidad de los alimentos y consumo de materia seca, (Weiss y Leip, 2012), es posible mitigar la emisión de CH₄ evitando alimentos poco digestibles como forrajes toscos, aunque se debe evaluar el impacto de producir alimento para el ganado de mejor calidad.

Cuadro 4. Emisiones de metano (Gg) y su equivalencia en CO₂ del ganado bovino carne en la Comarca Lagunera 2001 - 2014

Año	Fermentación entérica	Producción de estiércol	Emisión total	Equivalencias toneladas CO₂
2001	19.3	0.7	20.0	460,954.6
2002	28.0	1.1	29.0	667,321.7
2003	28.3	1.1	29.4	675,621.3
2004	29.4	1.1	30.5	700,908.7
2005	27.1	1.0	28.1	646,838.8
2006	27.2	1.0	28.2	649,664.8
2007	27.9	1.1	29.0	667,091.4
2008	25.9	1.0	26.9	618,920.2
2009	28.6	1.1	29.7	683,552.9
2010	27.0	1.0	28.0	643,771.2
2011	28.1	1.1	29.1	670,352.6
2012	25.5	1.0	26.5	609,383.4
2013	27.3	1.0	28.3	651,549.6
2014	28.0	1.1	29.1	669,427.9

Las emisiones de óxido nitroso durante el periodo evaluado fueron de 9.9 Gg promedio anual equivalentes a 2,936,111.2 t de CO₂e, las cuales equivalen al 82.4% de las emisiones directas de GEI (Cuadro 5).

El volumen de las emisiones directas de óxido nitroso durante el periodo evaluado representó el 35.43% con respecto al volumen de las emisiones de CH₄, (9.9 Gg contra 28.0 Gg de CH₄). Sin embargo, en equivalencias de CO₂, el N₂O representa el 82.4% de las emisiones de GEI, lo cual se explica debido al

mayor potencial de calentamiento de éste gas con respecto al metano, a pesar de que el volumen de emisión es menor (Figura 8).

Las emisiones directas de GEI del bovino de engorda en la Comarca Lagunera representan el 50.6% de las emisiones totales calculadas por Ramírez-Flores *et al.*, (2015) para el ganado bovino lechero en la misma región durante el mismo periodo, a pesar de que el inventario del bovino cárnico es en promedio 14% superior al lechero; sin embargo, por unidad de producto generado, se tiene que para producir una tonelada de carne se emitieron 66.8 toneladas equivalentes de CO₂, mientras que para producir una tonelada de leche se emitieron 3.4 toneladas del mismo gas. Lo anterior explica la menor eficiencia de la producción de carne a pesar de una menor emisión de GEI por individuo.

El valor anterior de 66.8 toneladas de CO₂ emitidas directamente por tonelada de producto (carne) es muy superior al mencionado por Weiss y Leip (2012), quienes mencionan que en la Unión Europea la producción de una unidad de carne genera desde 14.2 (Austria) hasta 40 (Chipre y Letonia) unidades equivalentes de CO₂, mientras que en Brasil el promedio es de 48 (Cederberg *et al.*, 2009). Esto puede ser un indicativo de la baja eficiencia para la producción de carne de bovino en la Comarca Lagunera, demostrando la posibilidad de poder implementar medidas que sean significativas para reducir las emisiones de GEI.

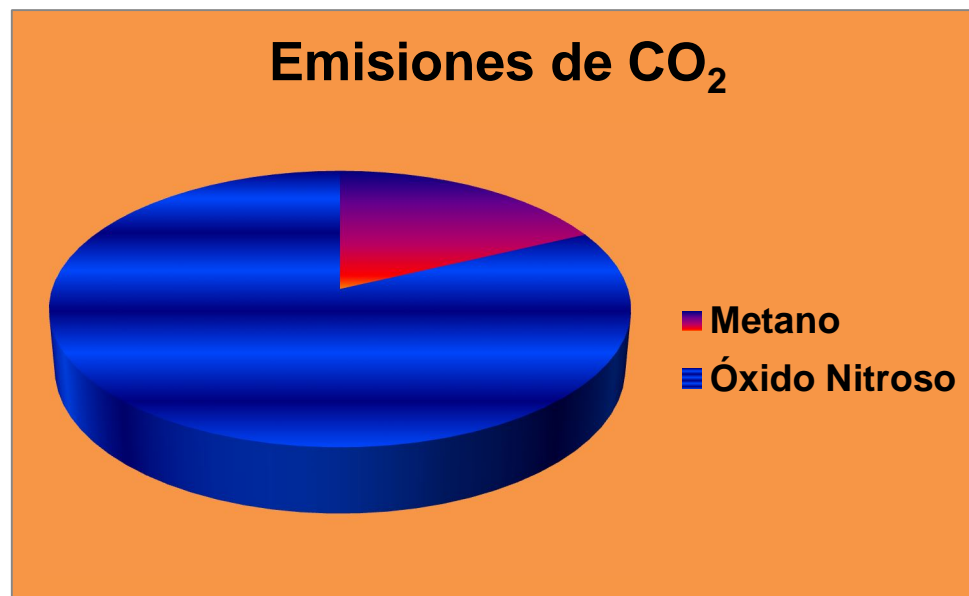


Figura 8. Participación de emisiones equivalentes de CO₂ del metano y óxido nítrico del ganado bovino carne en la Comarca Lagunera

El costo total de las emisiones directas de GEI fue de 986.75 millones de pesos mexicanos (€ 56,386,030.8) promedio anual, cantidad menor al valor de la producción durante el mismo periodo que fue de 1,446.86 millones de pesos (€ 82,677,714.3).

Cuadro 5. Emisiones de N₂O y sus equivalencias en CO₂ del ganado bovino carne en la Comarca Lagunera 2001 - 2014

Año	Inventario	N2O-N	Óxido nítrico	Equivalencias toneladas de CO₂
2001	364,391	4.5	7.1	2,101,724.0
2002	527,527	6.5	10.3	3,042,655.2
2003	534,088	6.6	10.4	3,080,497.5
2004	554,078	6.9	10.8	3,195,795.3
2005	511,335	6.3	10.0	2,949,263.4
2006	513,569	6.4	10.0	2,962,148.6
2007	527,345	6.5	10.3	3,041,605.4
2008	489,265	6.1	9.5	2,821,968.7
2009	540,358	6.7	10.5	3,116,661.4
2010	508,910	6.3	9.9	2,935,276.6
2011	529,923	6.6	10.3	3,056,474.7
2012	481,726	6.0	9.4	2,778,485.5

2013	515,059	6.4	10.0	2,970,742.6
2014	529,192	6.6	10.3	3,052,258.5

El costo total de las emisiones directas de GEI (€ 56,386,030.8) representa el 68.19 % del valor de la producción (€ 82,677,714.3). Si el costo de las emisiones se agregara al costo de producción, la rentabilidad de la actividad se vería seriamente afectada, además de ocasionar un incremento en el precio del producto en el mercado.

3.3. Emisiones indirectas de GEI

Durante el periodo de 2001 a 2014 el promedio de emisiones equivalentes de CO₂ debidas a la producción de forrajes para alimentar al ganado fue de 1,1234,419 toneladas al año, como resultado de las aplicaciones estimadas de fertilizantes nitrogenados, con un costo de 309,642,483 pesos mexicanos (17,693,860 euros). El cultivo que contribuyó con más emisiones fue el maíz forrajero con el 71.8% del total, seguido de la avena con el 17.9% y la alfalfa con el 10.3%. El hecho de que el cultivo del maíz sea el mayor emisor de GEI puede deberse a la mayor superficie que ocupa éste cultivo además de la gran cantidad de fertilizantes nitrogenados que se requieren aplicar para su producción (Figura 9).

Lo anterior contrasta con los resultados obtenidos por Ramírez-Flores *et al.* (2015) que encontraron diferentes patrones de emisiones para cultivos forrajeros para la producción de leche, debido a que para el bovino lechero se tiene un patrón de cultivos diferentes, en donde el sorgo forrajero fue el mayor emisor de GEI, aunque en el caso de la alfalfa, su contribución a las emisiones es muy similar (12 %).

Las características de las dietas que tienen como principal ingrediente forrajero al ensilado de maíz son la razón por la que éste cultivo es el que contribuye en mayor grado con las emisiones de GEI, además de requerir mayor fertilización nitrogenada que los otros cultivos. En el caso de la alfalfa, el

proceso de cálculo de las emisiones se realizó siguiendo la metodología propuesta para las leguminosas fijadoras de nitrógeno.

Del total de las emisiones directas e indirectas, la producción de forrajes representa el 24% (Figura 10). Esto contrasta con lo que se presenta en el ganado bovino lechero en la misma región, en donde la producción de forrajes llega a representar hasta el 60% (Ramírez-Flores *et al.*, 2015). Una posible explicación en ésta diferencia es que el ganado lechero tiene un sistema altamente especializado e intensivo, con inventarios ganaderos mayores, donde los consumos de alimento son superiores y con un ciclo productivo más prolongado, lo que se refleja en un mayor requerimiento de superficie y volumen de producción, provocando una mayor explotación de los recursos para mantener éste sistema de producción.

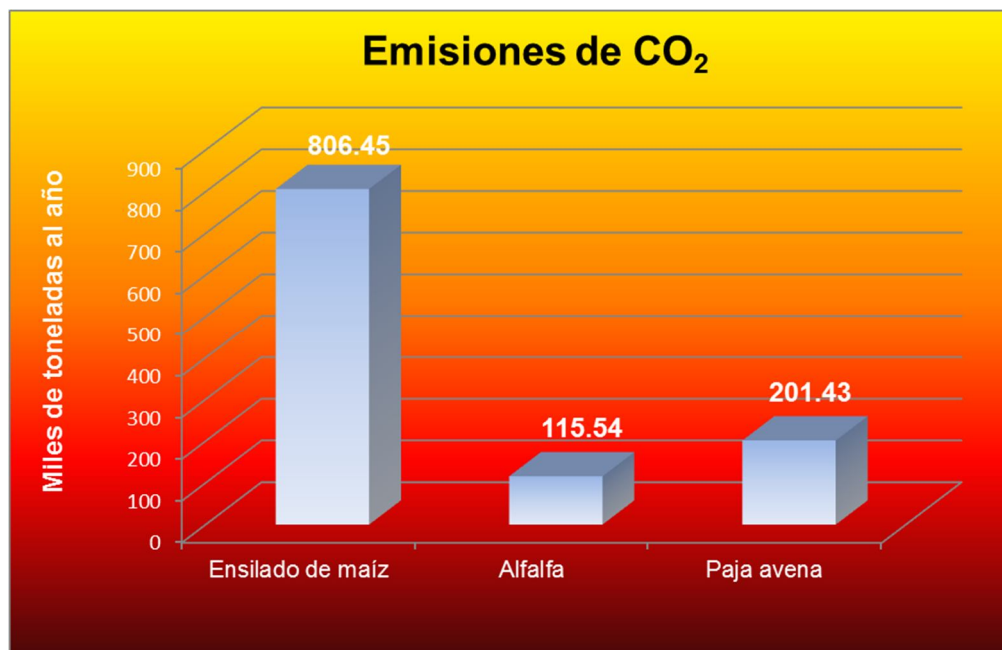


Figura 9. Emisiones equivalentes de CO₂ de cultivos forrajeros utilizados para alimentar el ganado bovino carne en la Comarca Lagunera

El costo total de las emisiones de GEI (directas e indirectas) es de 1,296.4 millones de pesos (74,079,890 Euros), que representan el 89.6% del valor de la

producción, el cual es de 1,446.9 millones de pesos (82,677,717 Euros) (Cuadro 6).

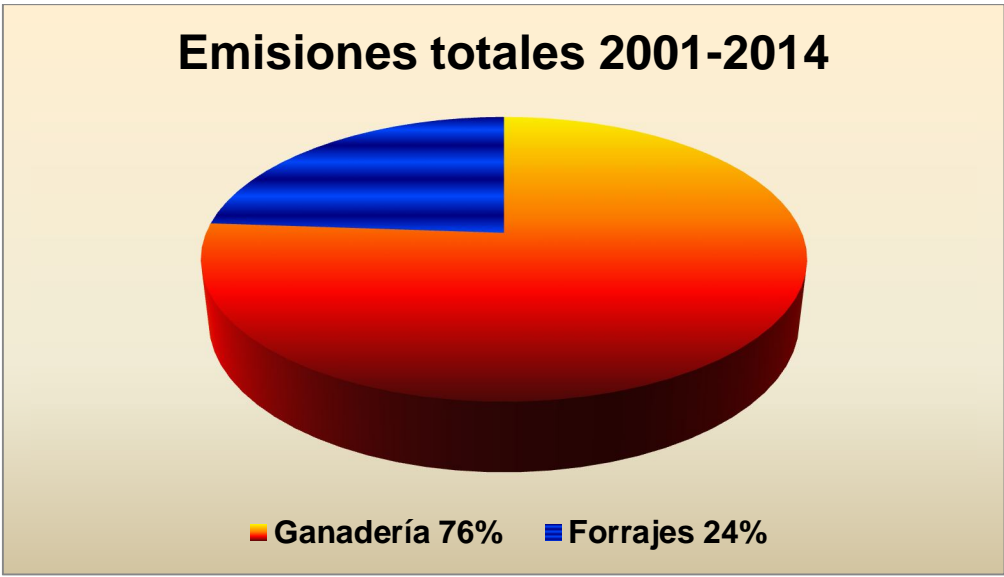


Figura 10. Participación de la agricultura (forrajes) y la ganadería en la emisión de GEI del ganado bovino carne del 2001–2014 en la Comarca Lagunera, México.

Cuadro 6. Volumen y costo de las emisiones del ganado bovino de carne en la Comarca Lagunera 2001 - 2014

Año	Emisiones equivalentes de CO ₂ (miles de toneladas)		Costo de las emisiones (miles de Euros)	
	Ganadería	Forrajes	Ganadería	Forrajes
2001	2,562.7	724.7	40,362.2	11,414.6
2002	3,710.0	1,256.7	58,432.1	19,792.4
2003	3,756.1	1,280.1	59,158.9	20,162.0
2004	3,896.7	1,292.0	61,373.1	20,349.0
2005	3,596.1	1,218.1	56,638.6	19,185.5
2006	3,611.8	1,225.2	56,886.1	19,296.4
2007	3,708.7	1,189.5	58,412.0	18,734.1
2008	3,440.9	1,074.6	54,194.0	16,924.7
2009	3,800.2	1,110.4	59,853.4	17,488.0
20010	3,579.0	1,026.9	56,370.0	16,173.8
2011	3,726.8	1,066.2	58,697.5	16,793.0
2012	3,387.9	984.4	53,358.9	15,504.0
2013	3,622.3	1,124.3	57,051.1	17,707.3
2014	3,721.7	1,154.9	58,616.6	18,189.0
Promedio	3,580.1	1,123.4	56,386.0	17,693.9

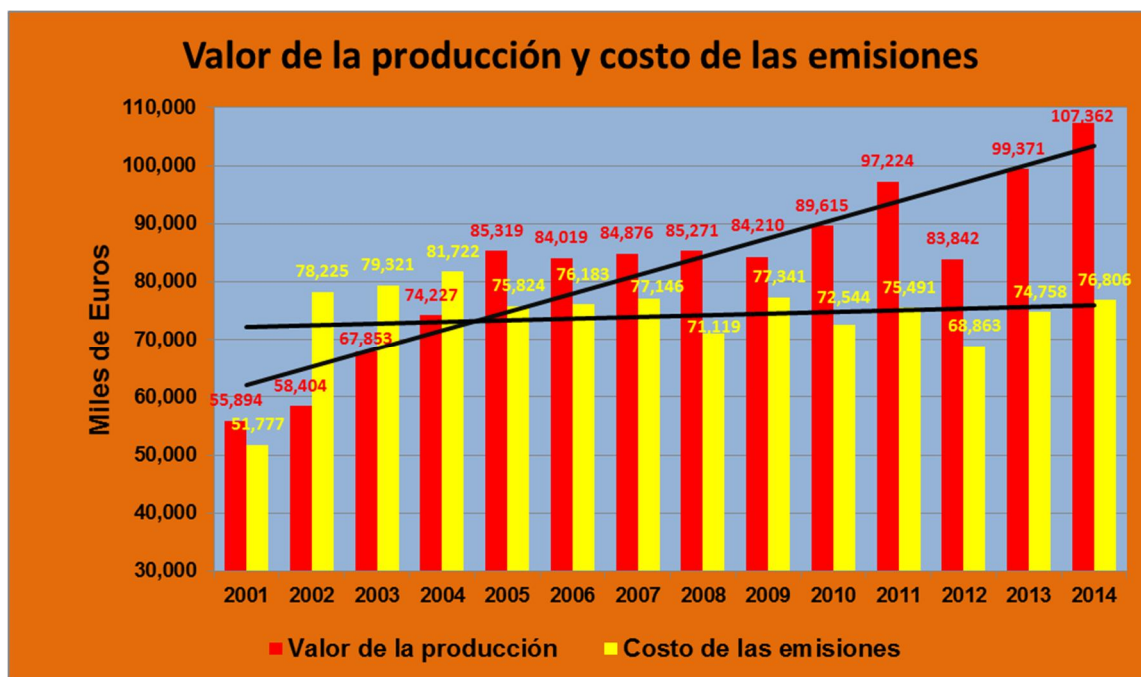


Figura 11. Comparativo del valor de la producción y el costo de las emisiones del ganado bovino de carne del 2001–2014 en la Comarca Lagunera, México.

Al sumar el costo de las emisiones indirectas con las directas, tenemos que el costo ambiental de las emisiones casi equivale al beneficio económico de la actividad (Figura 11), lo cual difiere con lo reportado por Ramírez-Flores *et al.* (2015) para el bovino lechero en la misma región, donde las emisiones de GEI representan sólo el 13 % del valor de la producción, con lo que se confirma que la producción de carne de bovino tiene una mayor huella de carbono que cualquier otro sistema ganadero. Por lo anterior, es necesario implementar medidas de mitigación de emisiones para que la actividad no pierda rentabilidad y también disminuir el impacto ambiental, y así mejorar la sustentabilidad del sistema.

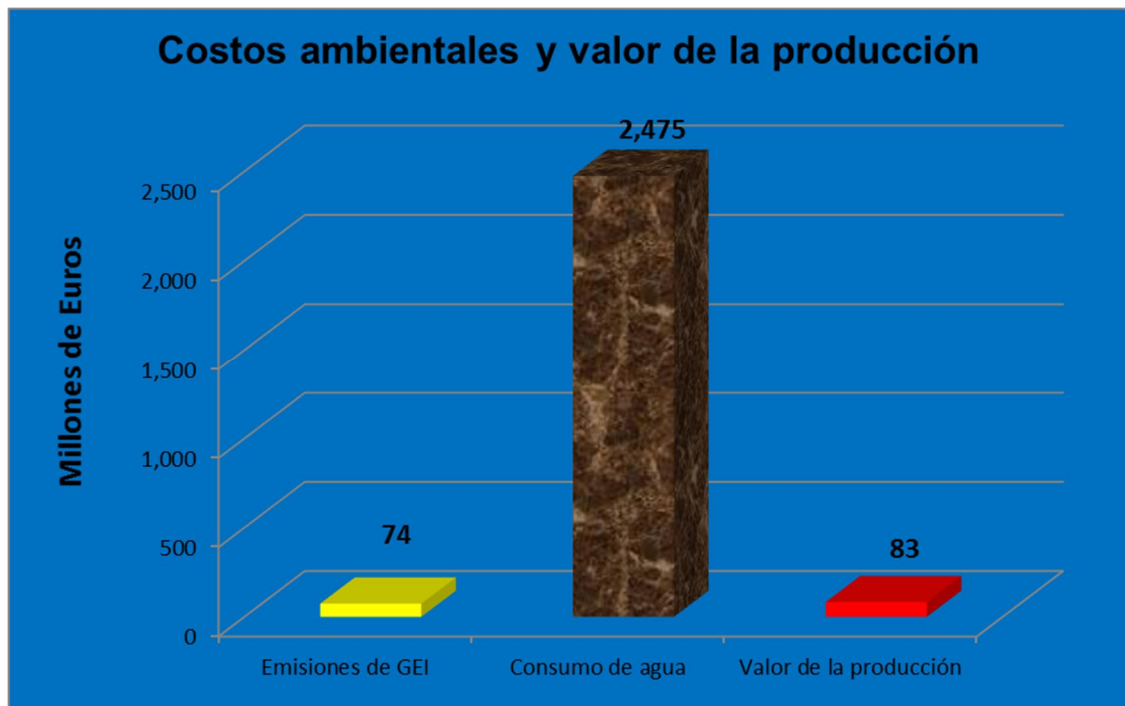


Figura 12. Comparativo de los costos ambientales y el valor de la producción del ganado bovino de carne en la Comarca Lagunera

Si comparamos los costos ambientales por consumo de agua y emisiones de GEI, puede observarse que la HH es el impacto ambiental más importante (Figura 12), lo cual concuerda con lo calculado por Ramírez-Flores *et al.* (2015) para la producción de leche de bovino. Esto representa un gran riesgo ya que el

vital líquido es un recurso escaso en la región, por lo que es importante aplicar medidas para mitigar el problema, como puede ser una reconversión de las actividades económicas hacia otras con menor impacto, así como una estratificación del sistema de producción, buscando otras áreas con mayor disponibilidad de agua para llevar a cabo parte del proceso productivo.

Para reducir la huella de carbono, se pueden buscar alternativas tales como el uso de bioenergías, aunque hay que considerar algunos aspectos como la sostenibilidad de las prácticas y la eficiencia de los sistemas de bioenergía (Smith *et al.*, 2014). A nivel hato se pueden implementar tecnologías y prácticas que mejoren la eficiencia de la producción, como puede ser el uso de alimentos de mejor calidad y dietas balanceadas para reducir las emisiones. Se pueden implementar prácticas de manejo del estiércol que mejoren la recuperación y reciclaje de nutrientes y energía (Gerber *et al.*, 2013).

Smith *et al.* (2014) nos ofrecen algunas alternativas para la mitigación de emisiones de CH₄ tales como: mejora de las raciones y aditivos alimenticios para reducir las emisiones procedentes de la fermentación entérica, razas mejoradas para una mayor productividad o reducción de emisiones procedentes de la fermentación entérica; tecnología microbiana tales como vacunas arqueas, metanotrofos, acetógenos, defaunación del rumen, bacteriófagos y probióticos; mejorar la fertilidad; manipulación y almacenaje de la cama de estiércol; uso de digestores anaeróbicos y biofiltros. Para la mitigación de N₂O se pueden utilizar dietas para reducir la cantidad y concentración de N en el excremento, el uso de inhibidores de la ureasa, cambiar el tipo de fertilizante, la tasa y el tiempo, manipular las prácticas de aplicación de estiércol, así como el manejo del pastoreo.

Para la mitigación de la HH se debe tomar en cuenta en dónde se da el mayor gasto de agua, que es la producción de forrajes y granos para la alimentación del ganado, por lo que una alternativa sería trasladar la producción de cultivos a otras zonas con mayor disponibilidad de agua, aunque esto podría

representar un aumento en los costos económicos y la huella de carbono debido a la transportación de grandes volúmenes de alimento. Para generar conciencia se podría implementar un cobro en el gasto de agua de acuerdo a los precios internacionales del agua.

Las medidas que se implementen para la mitigación de la HH y las emisiones de GEI representan un alto costo económico, pero es necesario invertir recursos para poder asegurar la sustentabilidad del sistema a largo plazo.

IV Conclusiones

Al analizar el valor bruto de la producción (VBP) del sistema bovino carne (SBC) en la Comarca Lagunera de \$ 1,878.8 millones (€ 107.4 millones) respecto al valor económico (VE) de HH de \$ 48,686.5 millones (€ 2,782.1 millones) sumado al VE de HC de \$ 1,344.1 millones (€ 76.9 millones), se observa un significativo impacto ambiental y económico del SBC. En efecto, el VBP-SBC representa únicamente el 3.8% del VE de HH y HC [\$ 50,030.6 millones (€ 2,859 millones)]. Por lo anterior, es imperativo delinear y adoptar estrategias de mitigación en el SBC con respecto al uso del agua y emisiones de GEI. Dicha estrategia será fundamental para lograr la sustentabilidad no solo del SBC, sino viabilidad ecológica, económica y social de la propia Comarca Lagunera.

El impacto del ganado bovino productor de carne en la Comarca Lagunera tiene un alto costo económico y ambiental. La integración del costo ambiental al costo de producción, generaría una nula rentabilidad, además de un encarecimiento del producto.

Los productores de bovino de carne son responsables de una gran parte del impacto ambiental generado por las emisiones antropogénicas de GEI, aunque en una menor medida comparado con el bovino lechero, debido principalmente a las diferencias en el inventario ganadero.

Se requiere implementar medidas de mitigación de emisiones. Dentro de las estrategias de mitigación se podría incluir un cobro la generación de emisiones según los precios internacionales, lo cual obligaría al sector a ser más eficiente y buscar cambios en su sistema, como puede ser la estratificación del sistema de producción mudando parte de la actividad a otras regiones donde el impacto ambiental sea menor.

La HH de la producción de carne de bovino es más alta que la de cualquier otro sistema de producción, lo cual es más grave considerando la escasez de precipitaciones en la región.

El beneficio económico generado por la producción de carne de bovino, se ve anulado por el costo ambiental, por lo que se pone en riesgo la sustentabilidad del sistema.

Es necesario realizar estudios experimentales para determinar los factores de emisión locales tanto en la subcategoría ganadería como para la subcategoría agrícola, con el fin de estimar con mayor precisión las emisiones de Gases de efecto invernadero.

Se deben invertir recursos económicos en prácticas de manejo y en investigación para reducir el impacto ambiental de la ganadería, para lograr la sustentabilidad a largo plazo de la producción de carne de bovino.

V Literatura citada

- AgroDer. 2012. Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica. WWF México y AgroDer. México DF
- Arto, I., Genty, A., Rueda-Cantuche, J.M., Villanueva, A., Valeria, A. 2012. Global Resources Use and Pollution. In: Production, Consumption and Trade (1995e2008), Vol. 1 (Luxembourg).
- Beauchemin, K. A., McGinn, S. M. 2005. Methane emissions from feedlot cattle fed barley or corn diets. J ANIM SCI 2005, 83:653-661
- Cardoso, L. A. 2012. Environmental and economics impacts of livestock productivity increase in sub-Saharan Africa. Trop Animal Health Prod. 44:1879-1884. DOI 10.1007/s11250-012-0151-z
- Cederberg, C., Meyer, D., Flysjö, A. 2009. Life Cycle Inventory of Greenhouse Gas Emissions and Use of Land and Energy in Brazilian Beef Production (SIK Report No. 792). The Swedish Institute for Food and Biotechnology, Gothenburg.
- Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y. 2010. 'The green, blue and grey water footprint of rice from both a production and consumption perspective', Value of Water Research Report Series No.40, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands, www.waterfootprint.org/Reports/Report40-WaterFootprintRice.pdf
- Chukwuocha, A. C., Ogbuagu, D. H., Okoro, V. O. 2010. A Comparative Analysis of Emission of Methane from Livestock Farms in Enugu, Eastern Nigeria. Journal of Agricultural Science and Technology A 1 (2011) 908-912. Earlier title: Journal of Agricultural Science and Technology, ISSN 1939-1250

- Environmental Finance. 2011. Está disponible en
<http://www.environmentalfinance.com/news/view/1970> al 10/11/2012
- FAO. 2011. World Livestock 2011 – Livestock in food security. Rome
- Foley A. Jonathan, Navin Ramankutty, Kate A. Brauman, Emily S. Cassidy, James S Gerber, Matt Johnston, Nathaniel D. Mueller, Christine O’Connell, Deepak K. Ray, Paul C. West, Christian Balzer, Elena M. Bennett, Stephen R. Carpenter, Jason Hill, Chad Monfreda, Stephen Polasky, Johan Rockström, John Sheehan, Stefan Siebert, David Tilman, David P. M. Zaks. 2011. Solutions for a Cultivated Planet. *Nature* 478, 337–342. doi:10.1038/nature10452
- Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., Tempio, G. 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Gobierno del Estado de Durango. 2012. Inventario Estatal de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de Durango. Categoría Agricultura. Victoria de Durango, Dgo.
- Hermansen, J. E., Kristensen, T. 2011. Management options to reduce the carbon footprint of livestock products University of Aarhus, Faculty of Agricultural Sciences, Department of Agroecology and Environment, Research Centre Foulum, PO Box 50, DK-8830 Tjele, Denmark
- Hoekstra Arjen Y., Ashok K. Chapagain, Maite M. Aldaya, Mesfin M. Mekonnen. 2011. The Water Footprint Assessment Manual Setting the Global Standard. Earthscan Ltd, Dunstan House, 14a St Cross Street, London. ISBN: 978-1-84971-279-8

- IPCC. 2003. Manual, orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre. Cap. 4 Agricultura. 106 p. ISBN 92-9169-316-2.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007 B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- Jungbluth, T., Hartung, E., Brose, G. 2001. Greenhouse gas emissions from animal house and manure stores. *NutrCyclAgroecosyst.* 60:45.doi:10.1023/A:1012621627268.
- Kjellsson, J., Liu, S. 2012. International Water Pricing. *Transboundary Waters.* Published by Dr. McKinney. 27 March 2012
- Kossoy, A., Peszko, G., Oppermann, K., Prytz, N., Gilbert, A., Klein, N., Lam, L., Wong, L. 2015. Carbon Pricing Watch 2015. Washington, DC. World Bank. Doi: 10.1596/978-1-4648-0268-3
- Kumar, P., Thiaw, I., Yashiro, M., Molinero, C. 2011. Food and Ecological Security: Identifying synergy and trade-offs. In *UNEP Policy Series. Ecosystem Management Issue No. 4*, June 2011.
- López Calderón, M. J., Figueroa-Viramontes, U., Fortis Hernández, M., Núñez Hernández, G. 2013. Estimación del contenido de nitrógeno en los

- estiércoles y su balance con el requerimiento de nitrógeno de los cultivos en la Comarca Lagunera. *Agricultura Orgánica: Sexta parte*, 2013. 295-313. Torreón, Coah.
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. 2010. The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products, *Value of Water Research Report Series No. 48*, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. 2012. A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems* (2012) 15: 401–415 DOI: 10.1007/s10021-011-9517-8
- Moran, D., Wall, E. 2011. Livestock production and Greenhouse Gas emissions: Defining the problem and specifying solutions. *Animal Frontiers Mag.* July 2011, Vol. 1, No. 1. Doi:10.2527/af.2011-0012
- Mosier, A., Kroeze, C., Nevison, C., Oenema, O., Seitzinger, S., Van Cleemput, O. 1998. Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle, *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 52, 225–248.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). 2014. *La situación demográfica en el mundo, 2014*. New York.
- Ramírez-Flores, J. J., Meza-Herrera, C. A., López-Villalobos, N., García-Martínez, A. 2015. Evaluación del impacto ambiental y económico del Ganado bovino lechero en la Comarca Lagunera, México. Tesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente de Zonas Áridas. URUZA-UACH. Bermejillo, Dgo.
- Romanovskaya, A. A. 2008. Methane and nitrous oxide emissions in the Agricultural Sector of Russia. *Russian Meteorology and Hydrology*. 33, 2: 117–124. DOI: 10.3103/S106837390802009X

SAGARPA. 2006. Plan rector del Sistema Bovino de Carne.

SAGARPA. 2010. Anuario Estadístico de la Producción Agropecuaria. SAGARPA- Delegación en la Región Lagunera. Cd. Lerdo, Durango. México.

Schneider, F. 2010. Drivers of change in global agriculture and livestock Systems. In *Livestock in a changing landscape: drivers, consequences, and responses*. Vol 1. Edited by Steinfeld, H., Mooney, H. A., Schneider, F. and Neville, L. E. Published By Island Press 2010.

Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE). 2010. *Livestock in a Changing Landscape: Drivers, Consequences, and Responses*. Volume 1. [Steinfeld, H., Mooney, H. A., Schneider, F. and Neville, L. E. (Eds.)]. Published by Island Press 2010.

SIAP. 2015. Población ganadera 2001-2014.

Smith, P., Gregory, P. J., Van Vuuren, D. 2010. Competition for land. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365, 2941–2957

Smith P., M. Bustamante, H. Ahammad, H. Clark, H. Dong, E. A. Elsiddig, H. Haberl, R. Harper, J. House, M. Jafari, O. Masera, C. Mbow, N. H. Ravindranath, C. W. Rice, C. Robledo Abad, A. Romanovskaya, F. Sperling, F. Tubiello, 2014: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T.

- Zwicker, J.C. Minx (Eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Stehfest, E., Bouwman, L., Vuuren, D. P., Elzen, M. G. J., Eickhout, B., Kabat, P. 2009. Climate benefits of changing diet. *Climatic Change*, 95, 83–102.
- Steinfeld Henning, Pierre Gerber, Tom Wassenar, Vincent Castel, Mauricio Rosales, Cees de Haan. 2006. In *Livestock Long Shadow*. Edit FAO Rom. ISBN 978-92-5-105571-7
- Thompson Reuters. 2011. Point Carbon. Está disponible en <http://pointcarbon.com/aboutus/pressroom> al 2011/11/10
- VijayaVenkataRamana, S., Iniyamb, S., RankoGoic. 2011. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.rser.2011.09.009
- Wackernagel, M., Schulz, N.B., Deumling, D., Linares, A.C., Jenkins, M., Kapos, V., Monfreda, C., Loh, J., Myers, N., Norgaard, R., Randers, J. 2002. Tracking the ecological overshoot of the human economy, 9266–9271. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United State of Americas*. PNAS. Vol. 99. No. 14.
- Weiss, F., Leip, A. 2012. Greenhouse gas emissions from the EU livestock sector: A life cycle assessment carried out with the CAPRI model. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 149 (2012) 124– 134
- White House. 2014. *Climate Action Plan: Strategy to Reduce Methane Emissions*. March 2014. Washington, D. C.
- Williams, A.G., Audsley, E., Sandars, D.L. 2006. *Determining the environmental burdens and resource use in the production of agricultural and horticultural commodities*. Main Report. Defra Research Project IS0205. Bedford:

Cranfield University and Defra. Available on www.silsoe.cranfield.ac.uk, and www.defra.gov.uk