

# **Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del sector agropecuario en Baja California**

## **Greenhouse Gases Inventory in the Agriculture Sector at Baja California**

*Gabriela Muñoz Meléndez\**

*Lilia Betania Vázquez González\*\**

### **Resumen**

Este estudio documenta la estimación de las emisiones de gases efecto invernadero provenientes de la agricultura en Baja California. Aunque se usó la metodología del IPCC 1996, los factores de emisión fueron ajustados a las condiciones climáticas regionales. Los resultados promedio para el período 1990-2010 indican que la principal emisión proviene de la fermentación entérica del ganado (269.9 Gg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup>), seguida de las quemas de residuos agrícolas (203.2 Gg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup>), las emisiones por el manejo de suelos (161.7 Gg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup>) y la gestión del estiércol (146.3 Gg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup>). Proyecciones a 2050 indican un incremento de las emisiones a una tasa de 0.25 Gg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup>. Señalamos también la relevancia de la selección de factores de emisión, al demostrar que la aplicación de los factores de Latinoamérica a Baja California subestiman las emisiones del ganado en 25% para el CH<sub>4</sub> y 34% para el N<sub>2</sub>O. Finalmente, presentamos un plan de mitigación que consiste en cinco estrategias de reducción, mismo que se proyecta a 2050 mediante cinco escenarios.

**Palabras clave:** gases efecto invernadero, cambio climático, agricultura, ganadería.

### **Abstract**

This study details the estimation of greenhouse gases emissions from the agriculture sector in Baja California. The computation method used was IPCC 1996; however, emission factors were chosen according to its closeness to the regional weather conditions. Results for the 1990-2010 period indicated the main emission came from enteric fermentation in the digestive systems of ruminants (269.9 Gg CO<sub>2</sub>e year<sup>-1</sup>), followed by biomass burning in croplands (203.2 Gg CO<sub>2</sub>e year<sup>-1</sup>), land management (161.7 Gg CO<sub>2</sub>e year<sup>-1</sup>) and manure management (146.3 Gg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup>). Emissions projections to 2050 indicate that there will be an increment of 0.25 Gg CO<sub>2</sub>e year<sup>-1</sup>. In addition,

---

\* Doctora en Ciencias Ambientales. El Colegio de la Frontera Norte. Correo electrónico: gmunoz@colef.mx (Investigadora responsable).

\*\* Maestra en Administración Integral del Ambiente. El Colegio de la Frontera Norte.

this paper points out to the importance of suitable emission factors to regional conditions, as the application of Latin America emission factors to the Baja California case resulted in underestimation of livestock emissions in 25% for CH<sub>4</sub> and 34% for N<sub>2</sub>O. Finally, a Mitigation Plan comprising five measures is drafted; this plan is projected to 2050 by means of five scenarios.

**Keywords:** greenhouse gases emissions, climate change, agriculture, livestock.

## Introducción

La causa mayoritaria del cambio climático son los vastos volúmenes de gases de efecto invernadero (GEIs) provenientes de actividades humanas. Esto evidencia la necesidad de mitigar dichas emisiones. Sin embargo, la tarea de reducción es titánica si se considera que el desarrollo de los países descansa sobre estas actividades. Así, las propuestas dirigidas a la disminución de GEIs deben basarse en un análisis cuantitativo, profundo y cuidadoso de los sectores, que permita determinar las fuentes clave de dichas emisiones y dirigir acciones de control y cambio, sin que esto afecte el desarrollo y bienestar de la población.

La cuantificación de las emisiones se hace mediante el uso de los inventarios de gases efecto invernadero. Esta herramienta se aplica generalmente a dimensiones nacionales. Sin embargo, recientemente los gobiernos locales han elaborado inventarios estatales con el fin de identificar las características particulares de sus emisiones en cada sector fuente y así poder modificar conductas, instalar tecnologías de prevención de daños ambientales y dirigir políticas en su jurisdicción.

Una de las cinco fuentes clave incluidas en cualquier inventario de emisiones GEIs es la agricultura. Este sector emite el 15% de las emisiones a nivel mundial, y es fundamento del sistema alimentario. La ganadería tiene una importancia adicional en lugares de bajos recursos, donde su principal objetivo es la generación de ingresos y abastecimiento de nutrientes (Randolph *et al.*, 2007).

A nivel mundial, los principales componentes de las emisiones de la agricultura son: el N<sub>2</sub>O liberado de las prácticas agrícolas en un 38%, el CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O provenientes del ganado en 38%, el CH<sub>4</sub> del cultivo del arroz en 11%, y el CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O de la quema de las sabanas, los bosques y los residuos agrícolas que conjuntamente representan el 13% restante (Burney *et al.*, 2010).

Cifras como las antes citadas se estiman generalmente usando la metodología del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de 1996, aprobada a nivel mundial. Hay que anotar que existe una nueva metodología, aparecida en el 2006, sin embargo aún no cuenta con el consenso mundial. Por esta razón prefiero la primera sobre la segunda.

La metodología IPCC (1996) considera que en la categoría Agricultura las emisiones de gases provienen de: la fermentación entérica del ganado, la gestión del estiércol, los suelos gestionados en la agricultura y las quemadas de residuos agrícolas.

La fermentación entérica es un proceso natural que emite  $\text{CH}_4$  al ambiente como producto de la digestión de los rumiantes. El proceso y por ende las emisiones se ven intensificados por el hacinamiento de un gran número de cabezas de ganado sobre un espacio limitado.

La producción de ganado genera estiércol que en cantidades adecuadas ayuda a mantener la fertilidad del suelo y que en exceso representa una fuente de contaminación del mismo; la introducción excesiva de estiércol rebasa la capacidad de absorción de nutrientes por los cultivos presentes y aumenta la probabilidad de que los nutrientes remanentes sean llevados por debajo del suelo mediante percolación de agua de lluvia o riego, hasta tener contacto e impactar negativamente en la calidad del agua profunda. El exceso de nutrientes también puede ser arrastrado por escurrimiento e impactar cuerpos de agua superficiales cercanos.

Si bien la gestión de estiércol disminuye problemas como los antes descritos, hay que agregar que los sistemas de tratamiento que se aplican a los desechos animales emiten gases; por ejemplo, los sistemas de separación mecánica generan una cantidad enorme de olores y  $\text{CH}_4$ , y en menor medida  $\text{NH}_3$  y  $\text{N}_2\text{O}$ ; estos sistemas son ampliamente usados en la producción porcina y bovina lechera (Martínez *et al.*, 2009). Así, cuando se habla de emisión por gestión del estiércol se refiere a la generación de  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{CH}_4$  durante procesamientos tales como la dispersión en el campo, las lagunas anaerobias, el uso de camas profundas o la transformación del estiércol en energía.

Las emisiones de  $\text{N}_2$  y  $\text{N}_2\text{O}$  en los suelos agrícolas están directamente relacionadas con la adición de fertilizante, sin embargo, dependen también del tipo del manejo que se le da al suelo agrícola, de la fuente de N aplicada, y de la humedad (Grageda *et al.*, 2000; Grageda *et al.*, 2004).

En el último inventario nacional de emisiones GEI, la ganadería contribuyó con el 49.5% de las emisiones de la categoría Agricultura, correspondiendo 84% a la fermentación entérica y 16% al manejo del estiércol. Por otro lado, la agricultura contribuyó con 50.5% de las emisiones, que provienen en un 99.4% de los suelos agrícolas, seguidas por las emisiones del cultivo del arroz con 0.046%, y por último las quemadas agrícolas con el 0.1%.

La agricultura de Baja California representa el 1% de la superficie sembrada en el país y aporta el 3% de la producción agrícola nacional. La ganadería estatal produce principalmente bovinos de engorda y leche de consumo local. Es relevante señalar que la agricultura en el estado depende de acuíferos superficiales, por lo que cabe preguntarnos cuán idónea es la actividad en un sitio como Baja California que tiene un clima semidesértico. Esta región es propensa a la sequía

meteorológica y tiene escasez de recursos hídricos (Cervantes, 2009). De hecho, estas características hacen del estado una de las zonas más vulnerables al cambio climático, y le confieren una fragilidad especial a las actividades agrícolas desarrolladas en la región.

En Baja California, la condición de vulnerabilidad del sector agropecuario y demás sectores productivos no ha pasado desapercibida. Desde hace algún tiempo se han emprendido acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático, tales como la instalación de biodigestores en los establos lecheros, la creación de un parque eólico y estrategias de difusión del ahorro de energía dirigidas a la población. Dentro de este contexto, las hipótesis de las que se partieron en este trabajo fueron dos: 1) el sector agropecuario es un emisor GEI importante en Baja California; 2) la caracterización de fuentes emisoras del sector permitirá delinear acciones de mitigación del cambio climático en el estado.

## **Metas del artículo**

El objetivo principal de este documento es cuantificar las emisiones de gases con efecto invernadero provenientes de las principales actividades del sector agropecuario para el período 1990-2010, en Baja California. Se muestran también las proyecciones a 2050 de cada fuente, y se compara el uso de los factores de emisión de Norteamérica y Latinoamérica a fin de señalar los más adecuados para describir las condiciones locales. Además, se sugiere un plan de mitigación que incluye cinco estrategias, cada una caracterizada por su potencial de reducción. Este plan se proyecta a 2050 bajo cinco escenarios.

## **Método**

Las emisiones de GEIs fueron estimadas para el período 1990-2010, y las tendencias se usaron directamente para proyectar las emisiones de quemas agrícolas y suelos agrícolas. Por otro lado, para elaborar las proyecciones de emisiones GEI a 2050 de la ganadería, se partió de las proyecciones de poblaciones animales, de las cuales se estimaron emisiones.

## **Emisiones de GEIs en el período 1990-2010**

Las variables estimadas fueron: CO<sub>2</sub>e de la ganadería, de las quemas agrícolas y de los suelos agrícolas; CH<sub>4</sub> de la fermentación entérica y de la gestión del estiércol; y N<sub>2</sub>O de la gestión del estiércol y de los suelos agrícolas. Las variables se estimaron anualmente a partir de 1990 y hasta 2010.

La metodología empleada fue la del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 1996). Los datos básicos para la estimación fueron: población ganadera (cabezas año

<sup>1</sup>), producción de cultivos (ton año<sup>-1</sup>) y superficie siniestrada (ha año<sup>-1</sup>). Estos datos se obtuvieron de SIAP (2009).

En el caso de las emisiones por quemas agrícolas, la metodología del IPCC estima las emisiones de los gases CH<sub>4</sub>, CO, N<sub>2</sub>O y NO<sub>x</sub>. En este estudio, dichos gases se convirtieron en CO<sub>2</sub>e aplicando el factor correspondiente. Los factores en unidades de CO<sub>2</sub>e fueron CH<sub>4</sub> = 21, CO = 1, N<sub>2</sub>O = 310 y NO<sub>x</sub> = 68.

La cantidad de fertilizante sintético aplicado a los cultivos se estimó considerando que en Baja California los cultivos están espacialmente delimitados; por ejemplo en el Valle de Mexicali, los principales cultivos son: trigo, algodón, alfalfa, cebolla, y hortalizas; en tanto que a la zona agrícola de la costa los principales cultivos son: tomate, cebolla, uva, fresa, olivo y hortalizas. Los datos sobre cultivos son requeridos por la metodología, en caso de datos faltantes la serie fue completada interpolando los datos existentes para el año 1995 y 2000 (Semarnat, 2010); en estos años se aplicaron 10.80 y 9.54 (N x10<sup>6</sup>) respectivamente. Los fertilizantes sintéticos fueron el sulfato de amonio, el nitrato de amonio, la urea, los fertilizantes fosfatados y las mezclas NPK. Para estimar la cantidad de N fijado por la siembra de leguminosas requerida en la metodología, utilizamos los datos de producción de frijol, garbanzo y haba publicados por SIAP (2009).

En este estudio se emplearon los factores de emisión de Norteamérica (IPCC, 1996), los cuales fueron los que mejor se ajustaron a las condiciones de Baja California. Con el objetivo de hacer una comparación, se estimaron también las emisiones con los factores de emisión para Latinoamérica, los cuales son los empleados en los inventarios de México.

## **Elaboración de proyecciones**

Las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O de cada fuente fueron proyectadas hasta el año 2050. La estimación de las proyecciones de las emisiones del ganado se basaron en la estimación de la población ganadera esperada para cada categoría de animales. Primero las tendencias de las emisiones 1990-2010 (SIAP, 2009) fueron analizadas y con base en ello se determinó el modelo que mejor se ajustara.

Para predecir las poblaciones de aves de huevo y de ganado bovino, se empleó el método Winters multiplicativo. Una vez elaboradas las proyecciones de cada una de las poblaciones animales, se estimaron las emisiones esperadas, a partir de la metodología del IPCC (1996).

El método multiplicativo de Winters también se usó directamente para estimar las emisiones provenientes de las quemas agrícolas y las emisiones de los suelos agrícolas.

El método de Winters se define como un procedimiento exponencial suavizado que proporciona una impresión de los movimientos presentes en los datos y permite el estudio de la tendencia para hacer predicciones o proyecciones a corto, mediano y largo plazo.

El modelo de Winters considera tres parámetros: nivel, tendencia y ciclos. El primero está relacionado con el factor aleatorio de la serie, el segundo con la tendencia y el tercero con el componente estacional. Tanto la tendencia como el factor cíclico toman valores entre 0 y 1. Las ecuaciones del modelo dan una mayor ponderación a observaciones recientes y menos peso a observaciones pasadas; las ponderaciones decrecen geométricamente a una tasa constante (Berenson, 1999; SAS, 1999). La ponderación inicial seleccionada para el factor nivel, tendencia y estacionalidad fue de 0.2 para reducir los errores de estimación. Para la elección del modelo se prefirió el que minimizara el error cuadrado medio.

Para la población de pequeños rumiantes se usó un modelo logístico. En este tipo de modelos la variable dependiente es dicotómica. La estimación considera que la función de los factores es el logaritmo del momio de determinada característica en la población (Méndez y Moreno, 2005). El modelo ajustado para la serie de datos del ganado caprino se refiere a la Curva S de Pearl-Reed, dado que la serie presentó esta distribución a lo largo del tiempo. Para el ganado porcino se usó un modelo exponencial y para las aves de carne un modelo exponencial modificado.<sup>1</sup>

La Ecuación 1 se utilizó para predecir la población de ganado bovino de carne y las emisiones directas de los suelos.

$$\hat{Y}_t = (0.2_{t-1} + 0.2_{t-1}) + 0.2_{t-p} \quad (1)$$

donde:

$$\hat{Y}_t = (L_{t-1} + T_{t-1}) + S_{t-k} \hat{Y}_t = (L_{t-1} + T_{t-1}) + S_{t-k}$$

$L_{t-1}$ : Factor aleatorio de la serie (constante), número de cabezas de ganado en el año t-1.

$T_{t-1}$ : Tendencia de la serie (pendiente del componente de tendencia), crecimiento del número de cabezas de ganado t-1.

$S_{t-p}$ : Componente estacional (factor estacional en el periodo t), número de cabezas de ganado por el período de tiempo del año actual o año t, k representa los períodos del pronóstico ( $k \leq p$ )

Para las emisiones indirectas de los suelos  $T_{t-1}$  fue igual a 0.3; y para la población del ganado bovino de leche y las aves productoras de huevo  $T_{t-1}$  fue igual a 0.6.

<sup>1</sup> En todos los casos se utilizó el paquete estadístico para computadora Minitab statistical software®, versión 13.20, propiedad de Minitab Inc (2000).

La Ecuación 2 de tendencia ajustada fue usada para la población de caprinos a lo largo del tiempo (t).

$$Y_t = (10^4) + [7.60042 - 10.5593 * (1.08181^t)]^{-1} \quad (2)$$

Para la población de ganado ovino a lo largo del tiempo (t) se aplicó la Ecuación 3.

$$Y_t = (10^5) + [1.60754 - 105.390 * (0.787397^t)]^{-1} \quad (3)$$

La distribución de datos del ganado porcino presentó un decaimiento a lo largo del tiempo (t). El modelo con los parámetros estimados se definió con la Ecuación 4.

$$Y_t = 44349.1 * (0.932359^t) \quad (4)$$

La distribución de la serie de datos de pollos de engorda ajustó un modelo exponencial modificado. Para suavizar los datos se utilizó un modelo ARIMA (0,2,2) de un período adelante para minimizar la suma de los cuadrados de los errores y un factor de tendencia (Ecuación 5).

$$Y_t = 0.900093 * t - 1 + 0.020392 * t - 1 \quad (5)$$

## **Construcción de escenarios de disminución aplicando un plan de mitigación**

Un plan de mitigación fue elaborado a partir de la revisión de la literatura y la identificación de reducciones de emisiones factibles para el estado de Baja California.

El plan de mitigación se compuso de cinco propuestas de mitigación factibles para Baja California. La posible reducción de las emisiones en el estado fue calculada considerando cada una de las siguientes propuestas:

- 1) Aplicar un plan de disminución de las quemas agrícolas
- 2) Disminuir el uso de fertilizantes
- 3) Reducir la carga animal
- 4) Modificar la dieta de los bovinos de engorda
- 5) Implementar tecnologías del manejo del estiércol

La primera estrategia que consiste en aplicar un plan de disminución de las quemas agrícolas depende de dos fases: 1) aplicar un pago a los productores para no continuar con las prácticas

tradicionales, y 2) instalar tecnologías para transformar los residuos en energía. Respecto a la primera fase, el pago a los productores, se trata de la asignación de 100 dólares por tonelada de residuo de cultivo no quemada (Quintero-Núñez y Moncada-Aguilar, 2008) y el cobro del incentivo económico estaría condicionado a la adopción gradual de la tecnología necesaria para el uso de la biomasa como fuente de energía o como abono orgánico. Las tecnologías que se proponen para el tratamiento de los residuos son los biodigestores anaeróbicos y la elaboración de composta. Entre las principales políticas que se deben considerar están la elaboración de planes de acción y la vigilancia de las autoridades de la no quema. Por otro lado, la fase de instalación de tecnologías de transformación es posible, de acuerdo con Valdez-Vázquez *et al.* (2010), el municipio de Mexicali tiene un potencial bioenergético de al menos 280320 ton de materia seca por año a partir de residuos de trigo, algodón y sorgo. Tal potencial se considera alto, y podría generar entre 1 y 78 MW de energía.

La segunda estrategia consiste en disminuir el uso de fertilizantes, misma que depende de la aplicación eficiente de los fertilizantes, es decir, la aplicación del mínimo requerido por las especies vegetales para alcanzar la máxima producción. La propuesta a seguir es la descrita por Uribe Montes *et al.* (2003) quienes probaron el uso de biosólidos como fertilizantes en los cultivos de algodón, alfalfa, avena. La dosis óptima fue de 11 a 13 ton ha<sup>-1</sup>. Con esta práctica, se reduciría el uso de fertilizantes químicos y la emisión debida al manejo de los suelos.

La tercera estrategia consiste en la reducción del número de animales. Si bien esta estrategia es costosa, es la más efectiva para reducir las emisiones de metano por fermentación entérica (Thornton *et al.*, 2009 y Wirsenius *et al.*, 2010).

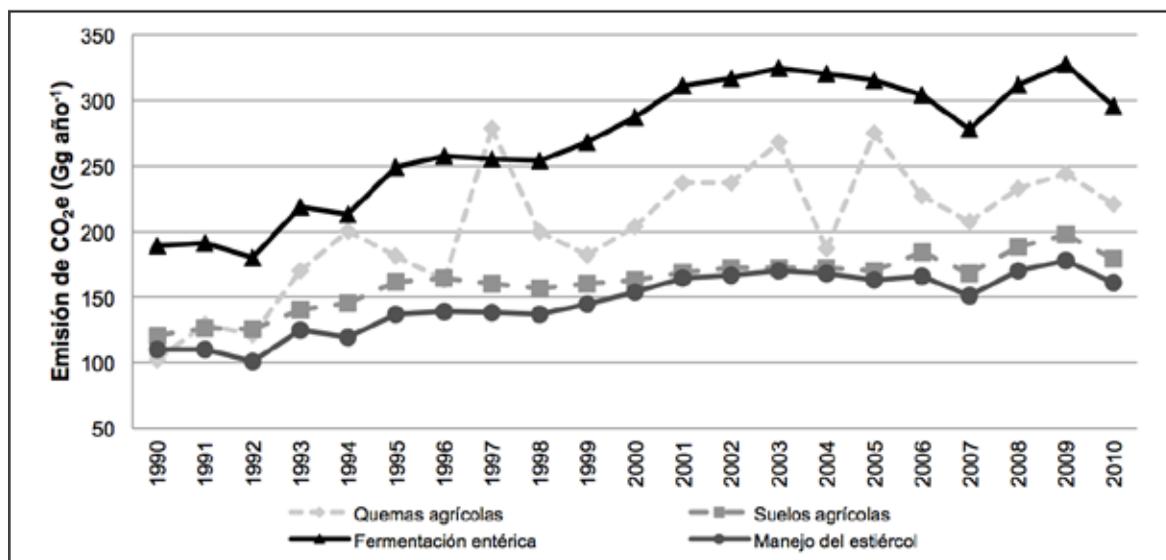
La cuarta estrategia consiste en modificar la dieta de los bovinos de engorda. Esta estrategia está dirigida al ganado de engorda debido a que es la población animal responsable de la mayor emisión de CO<sub>2</sub>e. Las modificaciones que se deben hacer a la dieta son: 1) reemplazo de forrajes por concentrados y mayor cantidad de aceites en la dieta, 2) promover la inclusión de aditivos, específicamente ionóforos en el alimento ofrecido.

La quinta estrategia consiste en la implementación de las tecnologías existentes para el manejo del estiércol. Las tecnologías consideradas es este trabajo fueron los biodigestores anaeróbicos, que degradan la materia orgánica en metano y dióxido de carbono principalmente, y fueron considerados debido a que han demostrado ser altamente eficientes en la disminución de las emisiones del gas metano y en la generación de energía limpia.

## Resultados

Las emisiones totales del sector agropecuario fueron 774.8 Gg CO<sub>2</sub>e, con un incremento de 0.60 Gg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup>. La media de las emisiones acumuladas en el período 1990-2010 fue de 275.2 Gg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup> debido a la fermentación entérica del ganado, 140.7 Gg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup> proveniente de la gestión del estiércol, 196.5 Gg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup> proveniente de las quemas de residuos agrícolas; y 162.4 Gg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup> por el manejo de los suelos agrícolas (Figura 1).

**Figura 1: Emisiones anuales durante el periodo 1990-2010 de fermentación entérica, gestión del estiércol, quemas agrícolas y de los suelos agrícolas**



Fuente: Elaboración propia

La mayor fuente de emisión provino de la ganadería (que incluye a la fermentación entérica y el manejo del estiércol), con un 53% del total de las emisiones del sector, mientras que las quemas agrícolas emitieron un 26% y los suelos agrícolas un 21%. Dentro de la ganadería, 35% de las emisiones se debieron a la fermentación entérica y 19% a la gestión del estiércol.

La fuente de emisiones que presentó un mayor incremento fue la fermentación entérica, con una tasa de 0.82 Gg año<sup>-1</sup>. Las emisiones por quemas agrícolas se comportaron de forma polinómica, tendencia que corresponde a las fluctuaciones de la producción agrícola (Figura 1). Los suelos agrícolas presentaron un incremento con tendencia lineal de 0.59 Gg año<sup>-1</sup>, lo cual coincidió con la tendencia del continente americano del incremento en la producción y aplicación de los fertilizantes (FAO, 2005).

En este estudio se encontró que en el período 1990-2010 los bovinos fueron responsables del 95% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>e provenientes de la ganadería, por fermentación entérica y por el manejo de su estiércol. Estos resultados coinciden con Ogino *et al.* (2004) cuya metodología fue el análisis del ciclo de vida. Ellos encontraron que la mayor producción de CO<sub>2</sub>e como emisión de meta-no por fermentación entérica del animal, con el 48% de la contribución total, seguida de los procesos industriales de la carne y del transporte del alimento para los animales. Estos últimos apartados no son considerados en el estimado de las emisiones de la agricultura en la metodología del IPCC.

De acuerdo al inventario GEI nacional incluido en la cuarta comunicación (INE, 2009), la ganadería emitió el 84% de la emisión de CO<sub>2</sub>e del sector agropecuario, lo que coincide con la tendencia en Baja California. En contraste, en el país las emisiones debidas al manejo de los suelos agrícolas representaron el 15.5% de las emisiones de la agricultura y ocuparon el lugar número dos de esta categoría. Las quemadas *in situ* de residuos agrícolas representaron tan sólo el 0.1% del sector agrícola a nivel nacional a diferencia de este estudio, donde forman 25% de las emisiones del sector.

Las emisiones de los suelos agrícolas dependieron de la cantidad de fertilizantes sintéticos usados en la agricultura y del cultivo de plantas fijadoras de nitrógeno. Al igual que en el estudio de Galford *et al.* (2010), quienes estimaron las emisiones de N<sub>2</sub>O en la región con mayor deforestación; las emisiones de N<sub>2</sub>O por el uso de fertilizantes tuvo una tendencia a incrementarse, como lo reporta este estudio.

El estudio de Quintero y Moncada (2008) en Baja California, reportó que por la quema de los residuos de trigo se emitieron 13.87 y 20.18 Gg de CO en 2003 y 2004 respectivamente. Estos autores determinaron los factores de emisión de forma directa, y por lo tanto más precisa. En cambio en este estudio se estimaron 23.75 Gg de CO para el 2003 y 20.77 para el 2004. Esto indica que existe una sobrestimación de 24% en promedio al usar la metodología del IPCC.<sup>2</sup>

## Proyecciones

Las proyecciones indicaron que las emisiones totales del sector agropecuario se incrementarán a una tasa de 0.25 Gg año<sup>-1</sup> en los siguientes 35 años. Dentro de este sector la fuente que tendrá un mayor crecimiento será la ganadería con una tasa de 0.34 Gg año<sup>-1</sup>. Mientras que la de menor crecimiento serán las quemadas agrícolas con una tasa de 0.09 Gg año<sup>-1</sup> como se observa en el Cuadro 1.<sup>3</sup>

<sup>2</sup> En la frontera Baja California-California y específicamente en el Valle Imperial-Mexicali, se han desarrollado estudios de monitoreo para determinar el impacto en calidad del aire debido a las quemadas agrícolas. El equipo de monitoreo generalmente es de la Usepa o el CARB, aunque existen cinco estaciones de monitoreo en Mexicali que pertenecen al Gobierno Estatal. Esta información es accesible en ambos lados de la frontera y una persona no necesariamente debe poseer equipo de medición.

<sup>3</sup> La cifra "549" para quemadas agrícolas en 2045 es la estimada por el modelo.

### Cuadro 1. Proyección de las emisiones anuales de las actividades del sector agropecuario (Gg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup>).<sup>4</sup>

Actividad	Año							
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ganadería	571,2	603,5	653,4	683,8	735,3	764,4	817,6	850,7
Quemas agrícolas	289	109,2	209,6	418,9	140,6	276,8	549	317,4
Suelos agrícolas	206	218,4	233,2	245,4	260,4	272,5	287,6	299,5
Total	1066,2	931,2	1096,2	1348,1	1136,2	1313,6	1654,1	1467,6

Fuente: Elaboración propia

### Comparación de los factores de emisión

El tipo de factor determina en gran medida que el nivel del inventario sea 1, 2 o 3. A continuación una breve descripción de cada uno:

**Nivel 1-** Es el menos detallado, utiliza factores de emisión relacionados a información socioeconómica, generalmente con incertidumbre elevada, e información de actividad general relacionada al sector que genera las emisiones.

**Nivel 2-** Para determinar la cantidad de emisiones se usan métodos específicos como el balance de masa y factores de emisión de proceso.

**Nivel 3-** Es una evaluación rigurosa y específica de la fuente, estilo *bottom-up*, que requiere de inventarios detallados de la infraestructura y de factores de emisión específicos o determinación de emisiones en la fuente.

El trabajo aquí resumido buscó llevar el inventario a un nivel 2, sin embargo la falta de caracterizaciones locales precisas obligó en varias ocasiones a aplicar factores de defecto sugeridos por el IPCC (1996) para desarrollar un inventario nivel 1. Así, el inventario estatal GEI resultante oscila entre los niveles 1 y 2.

De entre los factores de defecto recomendados por las guías de elaboración de inventarios GEI del IPCC, se encuentran aquellos que contemplan la ubicación geográfica. Así, para modelar la estimación de emisiones GEI en la ganadería en México, se sugiere usar los factores de defecto para Latinoamérica. Estos factores asumen un metabolismo animal basado en dietas con forrajes

<sup>4</sup> La tendencia de las quemas agrícolas no es lineal, sino incrementa por “estacionalidad”; si se piensa en una figura, se visualizarán picos cíclicos, por eso se recurrió a un modelo multiplicativo de Winters.

y pastos tropicales, razas cabuínas y pastoreo de los rumiantes. En el caso de los animales mono-gástricos, se asume poca industrialización. Sin embargo éstas no son las condiciones que reflejan la situación local.

Baja California se caracteriza por tener el ganado estabulado, con alimentación basada en ingredientes de alta calidad como la alfalfa, el trigo, suplementos y pre-mezclas, y se recurre al uso de líneas genéticas. Por otro lado, la producción es industrializada en las aves y los cerdos. Las condiciones antes descritas son mejor representadas mediante factores de emisión para Norteamérica.

Usar factores de defecto introduce incertidumbres. Habría que preguntarse si éstas aumentan al usar factores de defecto evidentemente alejados de las condiciones locales imperantes. Ante esta interrogación, se decidió comparar las emisiones resultantes usando factores de defecto “recomendados”, es decir para Latinoamérica, contra factores de defecto más representativos de las condiciones locales, esto es para Norteamérica. Para desarrollar este ejercicio, las emisiones totales de metano y óxido dinitrógeno fueron calculadas dos veces usando factores de defecto tanto para Latinoamérica como para Norteamérica.

Las emisiones totales de  $\text{CH}_4$  por fermentación entérica y gestión del estiércol estimadas por ambos factores de defecto fueron comparadas, esto evidenció una subestimación de 25% usando factores de defecto para Latinoamérica en contraste con los factores correspondientes a Norteamérica. Las emisiones promedio fueron de 13 Gg año<sup>-1</sup> usando los factores de Latinoamérica (LA) y 18 Gg año<sup>-1</sup> para Norteamérica (NA). Entre categoría de animales la diferencia fue mayor para los pequeños rumiantes y menor para los bovinos (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Emisiones promedio de  $\text{CH}_4$  por fermentación entérica y gestión del estiércol por categoría de animales. Período 1990-2010.**

Factores de emisión	Categoría de animales			
	Bovinos	Porcinos	Pequeños rumiantes	Aves
América Latina (Gg año-1)	13,309	0,045	0,241	0,025
Norteamérica (Gg año-1)	18,018	0,319	0,288	0,164
Diferencia (%)	26	86	95	85

Fuente: Elaboración propia

En el ejercicio de comparación, la diferencia principal fue por manejo del estiércol y después por la fermentación entérica. Para el manejo del estiércol, tuvieron la mayor diferencia las emisiones generadas por el ganado bovino de leche. Esto es porque en Baja California los animales permanecen

estabulados, y por ende el estiércol se acumula en los corrales y en las salas de ordeña, mismas que se limpian con grandes cantidades de agua, a diferencia de estimados usando factores de defecto “recomendados” en los cuales se asume que los animales pastorean la mayor parte del tiempo.

Por otro lado, las emisiones de  $N_2O$  por la gestión del estiércol según procedimientos “recomendados” están subestimadas en 34%. En el período 1990-2010, las emisiones totales promedio fueron  $0.183 \text{ Gg año}^{-1}$  con los factores de emisión para Latinoamérica, mientras que con los factores de emisión de Norteamérica se estimaron  $0.278 \text{ Gg año}^{-1}$ .

La diferencia de  $N_2O$  entre factores de emisión se debe a que, de acuerdo a condiciones de Norteamérica, los animales se encuentran en confinamiento, no pastorean. Sucede un escenario similar con los pequeños rumiantes, pero en menor proporción. En contraste, hay una mayor diferencia para la producción de aves y cerdos, estimando una mayor emisión con Latinoamérica. Esto se debe a que los sistemas de producción intensivos manejados en la región proporcionan un manejo del estiércol distinto al de América del Sur, principalmente camas de rastrojo para aves y lagunas para cerdos.

El ejercicio mostró claramente que incluso recurriendo al uso de factores de defecto, se deben revisar e identificar los factores de defecto más representativos de la región que se está estudiando, incluso cuando la recomendación por “ubicación geográfica” indique algo distinto. Con todo, es preferible desarrollar factores de emisión específicos para la región. Kebreab *et al.* (2008) determinaron una sobreestimación de las emisiones en un 12.5% para el ganado bovino de leche y una subestimación de 9.8% para el ganado bovino de carne, al usar los factores por defecto contra factores de defecto regionalizados. Se reconoce que los factores de emisión aplicados en los inventarios nacionales no son representativos de las condiciones de todo México; sin embargo, las investigaciones realizadas hasta ahora en la búsqueda de factores de emisión nacionales han hallado estimaciones únicamente para la explotación del ganado bovino, no aplicables para el norte de México (González-Ávalos y Longoria-Ramírez, 2005).

## **Proyecciones esperadas con un plan de acción**

Para calcular las proyecciones a 2050 por estrategias consideradas en un plan de acción se prepararon cinco escenarios: A, B, C, D, y E que de manera ascendente incorporan acciones de mitigación.

El escenario A o escenario Business as Usual (BAU) considera que el sector agropecuario en Baja California seguirá los mismos procedimientos y métodos hasta ahora utilizados sin incorporar ninguna medida de reducción de emisiones GEI.

El escenario B plantea que la única medida de mitigación adaptada será la reducción de las emisiones de metano por fermentación entérica. La implementación de esta medida resultaría en una reducción del 30% del escenario BAU.

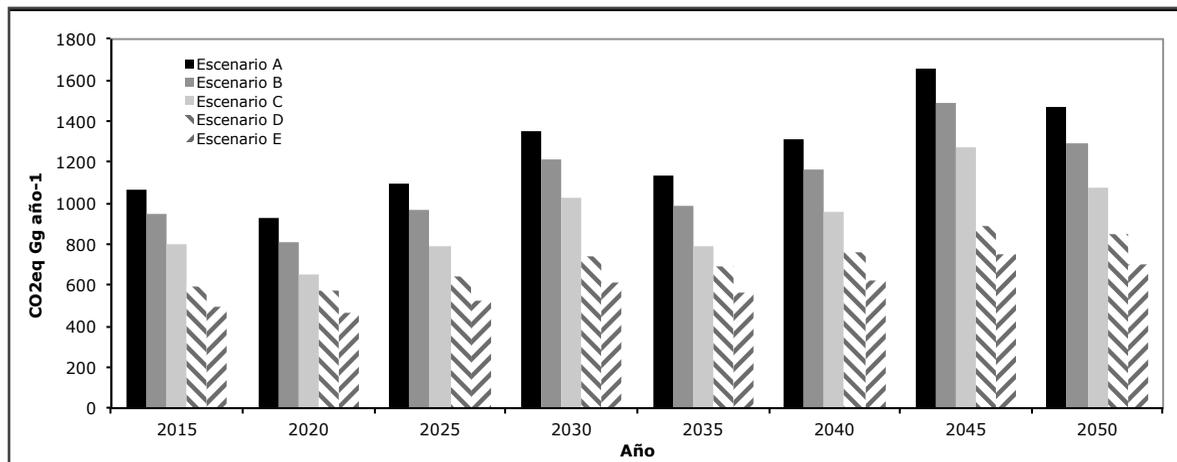
El escenario C contempla la medida de reducción del Escenario B más la reducción de 80% de las emisiones de óxido nitroso generados por la gestión del estiércol.

El escenario D considera las medidas de mitigación del Escenario C más la reducción del 70% de CO<sub>2</sub>e provenientes de quemas de residuos agrícolas.

El escenario E o escenario óptimo incorpora las medidas de mitigación del Escenario D más la reducción del 50% de las emisiones provenientes de los suelos agrícolas. La aplicación de este escenario reduciría 44% de las emisiones totales provenientes de la Agricultura en Baja California. Esto se traduciría en una disminución de 377.7 Gg de CO<sub>2</sub>e por año.

En la Figura 2 se muestran las posibles reducciones de las emisiones provenientes de la agricultura aplicando los escenarios descritos antes.

**Figura 2. Emisiones esperadas para el sector de agricultura en Baja California bajo diferentes escenarios del plan de mitigación a 2050.**



Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la Figura 2, el peor escenario es el de la inacción. Queda claro que mientras más rápido se adopten medidas de reducción de emisiones, mejor. Sin embargo, es pertinente resaltar que hasta 2025 la adopción gradual de medidas hasta el escenario C tiene un resultado casi tan efectivo como el alcanzado con el escenario óptimo; esto es relevante porque significa que

la adopción gradual da una respuesta eficiente y tiempo para la implementación de medidas más costosas. A partir de 2030 se vuelve imperativo adoptar las estrategias del escenario D –por lo menos– a fin de mantener al sector agropecuario de Baja California con un desarrollo bajo en carbono.

## Conclusiones

Los resultados del Inventario Estatal de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para Baja California mostraron que la categoría principal de emisión fue el sector energético con la contribución de 76% de las emisiones totales, seguido de los procesos industriales que aportan el 15%, la agricultura con 6%, los desechos el 2% y el cambio de uso de suelo el 1% (Muñoz y Vázquez, 2012). A excepción de las estimaciones para la categoría Agricultura, las otras no se muestran aquí; sin embargo se citan debido a que confirman la primera hipótesis presentada en este trabajo, es decir que el sector agropecuario es un emisor GEI importante en Baja California. Los resultados listados antes muestran que la categoría Agricultura de hecho es el tercer emisor GEI en el estado, y por lo tanto es un tema de estudio relevante.

En términos de la contribución porcentual de las fuentes de emisión dentro de la categoría Agricultura, se identificó a la ganadería como la mayor fuente durante el período 1990-2010, ya que generó el 53% de las emisiones. Las quemaduras agrícolas y los suelos agrícolas contribuyeron con 26% y 21% respectivamente. Expresando las emisiones del sector agropecuario de Baja California en Giga gramos de bióxido de carbono equivalente (Gg de CO<sub>2</sub>e) se tiene que el sector en conjunto emitió en promedio 781.1 Gg de CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup> en el período de estudio. Dentro del sector, la ganadería emitió en total 416.2 Gg de CO<sub>2</sub>e, compuestos de 269.9 Gg de CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup> por fermentación entérica y 146.3 Gg de CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup> por gestión del estiércol. Las quemaduras agrícolas emitieron 203.2 Gg de CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup> y la gestión de los suelos agrícolas 161.7 Gg año<sup>-1</sup>.

Si por otro lado, se expresan las emisiones del sector agropecuario por gas de efecto invernadero generado: metano (CH<sub>4</sub>) y óxido dinitrógeno (N<sub>2</sub>O); se tiene que en el período 1990-2010, el gas metano fue el más abundantemente generado con 16 Gg año<sup>-1</sup>; cifra que se compone de 13 Gg de CH<sub>4</sub> año<sup>-1</sup> por fermentación entérica y 3 Gg de CH<sub>4</sub> año<sup>-1</sup> por gestión del estiércol. El promedio general de las emisiones de N<sub>2</sub>O fue 0.28 Gg año<sup>-1</sup> mismo que proviene de la gestión del estiércol.

Si bien la caracterización de las fuentes emisoras del sector agropecuario confirman la hipótesis de su importancia como emisor GEI en Baja California en el período de estudio, cabe la duda razonable de cómo se comportarán las emisiones del sector en el futuro. Ante esta pregunta se prepararon proyecciones a 2050 considerando que las actividades hasta hoy observadas en el sector agropecuario estatal seguirán la tendencia observada. Los resultados de las proyecciones a 2050 indican que las emisiones del sector agropecuario se incrementarán a una tasa de 0.25 Gg

CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup>, lo que representa en promedio 1230 Gg de CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup>. Si se toman en cuenta los tres componentes del sector, se tiene que 1) la ganadería emitirá a partir de 2015, 688 Gg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup> en promedio, 2) las quemas agrícolas emitirán 289 Gg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup>, y 3) la gestión de los suelos agrícolas, 253 Gg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup>.

Durante la elaboración del inventario en no pocas ocasiones se recurrió al uso de factores de defecto. La elección del factor de defecto parecía una tarea simple debido a que las propias guías de elaboración de inventario hacen recomendaciones; sin embargo es relevante verificar que las actividades emisoras que describen dichos factores se acerquen a la realidad que se intentan representar. Por ejemplo, para México, el factor de defecto recomendado para modelar las emisiones de ganadería es el de “Latinoamérica”, mismo que subestima las emisiones del ganado en Baja California. La diferencia representa 25% de las emisiones de CH<sub>4</sub> y 34% de las emisiones de N<sub>2</sub>O. Estos resultados enfatizan la importancia de realizar inventarios estatales atendiendo a las características locales, que permitan delinear las estrategias y las políticas públicas aplicables y enfocadas a la región.

A lo largo de este documento se mencionó que el objetivo final de la elaboración de un inventario GEI es proveer de información certera sobre la cual puedan delinarse estrategias de mitigación, mismas que para ser implementadas deben formar parte de un Plan Regional. Así, este trabajo incluye una descripción breve de un plan de mitigación que contempla la reducción de las quemas agrícolas, la disminución del uso de fertilizantes, la reducción de la carga animal, la modificación de la dieta de los bovinos de engorda y la implementación de las tecnologías del manejo del estiércol, medidas todas factibles y realizables en un período de tiempo corto a medio.

Adicionalmente, se desarrollaron cinco escenarios futuros de mitigación mediante la implementación y combinación de medidas incluidas en el plan de mitigación. La aplicación del plan en su escenario óptimo (donde se apliquen todas las medidas sugeridas) reduciría 44% de las emisiones de la Agricultura, correspondiente a 377.7 Gg de CO<sub>2</sub>e al año. Sin embargo hasta 2025, un escenario de dos medidas sería tan efectivo como el óptimo. Sin embargo después de esta fecha el escenario deseable se acerca a la adopción de al menos cuatro medidas de mitigación.

Estos últimos resultados confirman la segunda hipótesis de este trabajo: la caracterización de fuentes emisoras del sector agropecuario permitiría delinear acciones de mitigación del cambio climático en el estado, no sólo actualmente sino a futuro. Si bien es cierto que el uso de inventarios delinea puntualmente una intervención de mitigación en el sector bajo estudio y presenta un fundamento sólido para el desarrollo de políticas públicas, no debe obviarse que el éxito de las medidas depende de tres aspectos cruciales: 1) la adopción e implementación de las medidas de mitigación por los miembros del sector, 2) la vigilancia, cumplimiento y seguimiento de la implementación por

el gobierno en turno, y finalmente 3) la inversión no sólo en pro de la modernización del sector, sino en su transición hacia la sustentabilidad. Todo esto mientras el sector agropecuario en su carácter de primario cumple con las demandas de la sociedad.

## Referencias

- Berenson, M.L. (1999). *Estadística básica en administración, conceptos y aplicaciones*. Traducido por Domínguez A. 6ª ed. Pearson Educación. México. 943 pp.
- Burney, J. A., S. J. Davis, and D. B. Lobell (2010). "Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification". *Proceedings of the National Academy Sciences*. 107: 12052-12057.
- Cervantes M., A. (2009). "Calentamiento global y especies invasoras". En *Memoria del ciclo de conferencias calentamiento global*, Judith Virginia Ríos Arana (ed.). Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. México. pp: 13-38.
- Food and Agriculture Organization (FAO) (2005). *Tendencias mundiales actuales y perspectivas de los fertilizantes al 2008/09*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 60 p.
- Galford, G., J. M. Melillo, D. W. Kicklighter, T. W. Cronin, C. E. Cerri, J. F. Mustard, and C. C. Cerri. (2010). "Greenhouse gas emissions from alternative futures of deforestation and agricultural management in the southern Amazon". *Proceedings of the National Academy Sciences*. 107: 19649-19654.
- González-Ávalos, E. y Longoria-Ramírez, R. (2005). "Variación del pH durante los procesos anaeróbicos de emisión de metano por el secado y la fermentación de excretas de ganado bovino en el centro de México". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 21(4). 159-170.
- Grageda C., O. A., T. Medina C., J. L. Aguilar A., M. Hernández M., E. Solís M., G. A. Aguado S., y J. J. Peña C. (2004). "Pérdidas de nitrógeno por emisión de N<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O en diferentes sistemas de manejo y con tres fuentes nitrogenadas". *Agrociencia*. 38: 625-633.
- Grageda C., O. A., A. Vermoesen, O. Van-Cleemput, y J. J. Peña C. (2000). "Efecto del tipo de suelo, humedad y fuente de nitrógeno en las emisiones de N<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O". *Terra Latinoamericana*. 18: 1-9.
- Instituto Nacional de Ecología (INE) (2009). México, "Cuarta comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Instituto nacional de ecología". México. 276 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1996). IPCC "Guidelines for national greenhouse gas inventories: reference manual". *IPCC*. Japón. pp: 4.1 – 4.140.
- Kebreab, E., Johnson, K.A., Archibeque, S.L., Pape, D. and Wirth, T. (2008). "Model for estimating enteric methane emissions from United States dairy and feedlot cattle". *Journal of Animal Science*. 86:2738-2748.
- Martínez, J., P. Dabert, S. Barrington and C. Burton. (2009). "Livestock waste treatment systems for environmental quality, food safety, and sustainability". *Bioresourse Technology*. 100: 5527-5536.
- Méndez, I. y Moreno, H. (2005). "Razones de momios y cocientes de probabilidades, conceptos y estimación con modelos logísticos". *Monografías*. Vol 13. N° 29. Instituto de Investigaciones en matemáticas aplicadas y en sistemas. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Muñoz M. G. y Vázquez G. L. B. (2012). *Inventario de Gases de Efecto Invernadero para el estado de Baja California*. El Colegio de la Frontera Norte y la Secretaría de Protección al Ambiente del Gobierno de Baja California.
- Ogino, A., K. Kaku, T. Osada, and K. Shimada. (2004). "Environmental impacts of the Japanese beef as evaluated by a life-cycle assessment method". *Journal of Animal Science*. 82: 2115-2122.
- Quintero N., M. y A. Moncada A. (2008). "Contaminación y control de las quemas agrícolas en Imperial, California, y Mexicali, Baja California". *Región y Sociedad*. 20: 3-24.
- Randolph, T. F., E. Schelling, D. Grace, C. F. Nicholson, J. L. Leroy, D. C. Cole, M. W. Demment, A. Omore, J. Zinsstag, and M. Ruel. (2007). "Role of livestock in human nutrition and health for poverty reduction in developing countries". *Journal of Animal Science*. 85: 2788-2800.
- SAS Institute Inc. (1999). *SAS/ETS User's Guide*. (Versión 8, vol 1). Cary, NC : SAS Institute Inc. Estados Unidos de América. 1532 pp.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) (2010). "Base de datos estadísticos (Badesniarn). Dimensión económica. Consumo nacional aparente de fertilizantes. A partir de Fertimex, Comisión Nacional de Petróleo, Gas y Petroquímica, Fabricantes de Fertilizantes". Semarnat, 2010. En línea: <<http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/badesniarn/Pages/badesniarn.aspx>>. Consultado en octubre de 2010.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2009). "Base de datos: sistema de información agroalimentaria de consulta (Siacon)". Programa de cómputo para Windows® actualizado el 21 de septiembre de 2010. México. Disponible en línea: <<http://www.siap.gob.mx/>>. Consultado en octubre de 2010.
- Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes, O. Sirotenko, M. Howden, T. McAllister, G. Pan, V. Romanenkov, U. Schneider, S. Towprayoon, M. Wattenbach and J. Smith. (2008). "Greenhouse gas mitigation in agriculture". *Philosophical transactions of The Royal Society B*. 363: 789-813.
- Thornton, P.K., J. Van de Steeg, A. Notenbaert, and M. Herrero (2009). "The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know". *Agricultural Systems*. 101: 113-127.
- Uribe Montes H. R., N. Chávez Sánchez, G. Orozco Hernández (2003). "Uso de biosólidos como fertilizantes en cultivos forrajeros y algodón". En *Agricultura Orgánica*. Editado por Salazar Sosa Enrique, Fortis Hernández Manuel, Vázquez Alarcón Antonio, Vázquez Vázquez Cirilo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED. pp. 99 – 130.
- Valdez Vázquez, I., J. A. Acevedo Benítez, C. Hernández Santiago (2010). "Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:2147-2153.
- Wirsenius S., C. Azar and G. Berndes (2010). "How much land is needed for global food production under scenarios of dietary changes and livestock productivity increases in 2030?". *Agricultural Systems* 103: 621-638.

Recibido: 30 de agosto de 2013

Aceptado: 28 de octubre de 2013