



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA  
PRODUCCIÓN Y SALUD ANIMAL**

**ESTIMACIÓN DE COMPONENTES DE VARIANZA  
PARA LA PRODUCCIÓN DE METANO EN  
BOVINOS PRODUCTORES DE LECHE.**

**TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN  
Y DE LA SALUD ANIMAL**

**PRESENTA:**

**ENOC ISRAEL MEJÍA MELCHOR**

**TUTOR:**

**DR. SERGIO IVÁN ROMÁN PONCE, INIFAP.**

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTORAL:**

**DR. EVERARDO GONZÁLEZ PADILLA, FMVZ UNAM**

**DR. FELIPE DE JESÚS RUIZ LÓPEZ, FESC UNAM INIFAP**

**Ciudad Universitaria Cd.Mx**

**Febrero 2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **DEDICATORIAS**

A mi familia que es mi tesoro más grande.

En memoria de quien fuera mi mentor y amigo, MVZ Jesús Manuel Pérez Saldaña.

A todos los buenos amigos que conocí durante esta travesía, que hicieron posible este momento en mi vida y que siempre llevaré en el corazón.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi tutor principal Dr. Sergio Román Ponce quien me guiara en este camino, quien siempre me apoyara y brindara su tutela y amistad.

A mi comité tutor por su paciencia y tiempo

A mi comité jurado que se tomara el tiempo para evaluar mi desempeño a través de este documento.

A todos aquellos trabajadores de las unidades de producción quienes aparte de brindarme su ayuda incondicional para este trabajo, me obsequiaron su amistad y respeto.

## INDICE

INDICE DE CUADROS .....	6
1 RESUMEN .....	9
2 ABSTRACT .....	11
ABREVIATURAS.....	12
3 INTRODUCCIÓN.....	14
4 OBJETIVOS .....	16
<b>4.1 OBJETIVO GENERAL.</b> ....	16
<b>4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.</b> ....	16
5 HIPÓTESIS.....	17
6 ANTECEDENTES.....	18
<b>6.1 EL CRECIMIENTO POBLACIONAL LA DEMANDA DE ALIMENTOS Y SU IMPACTO EN EL CALENTAMIENTO GLOBAL.</b> ....	18
<b>6.2 GASES DE EFECTO INVERNADERO.</b> ....	19
<b>6.3 METANOGÉNESIS EN RUMIANTES</b> .....	21
6.3.1 MICROORGANISMOS METANOGÉNICOS .....	21
<b>6.4 IMPORTANCIA DE LA PRODUCCIÓN DE METANO DE LOS RUMIANTES A NIVEL GLOBAL.</b> .....	23
<b>6.5 LA GANADERÍA BOVINA PRODUCTORA DE LECHE EN MÉXICO.</b> .....	24
6.5.1 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE LECHE EN MÉXICO .....	24
6.5.2 SISTEMA INTENSIVO.....	25
6.5.3 SISTEMA FAMILIAR.....	26
6.5.4 SISTEMA TROPICAL ESPECIALIZADO.....	27
6.5.5 SISTEMA DE DOBLE PROPOSITO.....	28
<b>6.6 CUANTIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE METANO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN BOVINA</b> .....	29
<b>6.7 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE METANO ENTÉRICO EN RUMIATES</b> .....	31
6.7.2 TÉCNICAS CON RUMEN ARTIFICIAL O IN VITRO .....	31
6.7.3 TÉCNICAS CON <i>TRAZADORES</i> .....	33
6.7.4 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE METANO IN SITU E IN VIVO .....	34
<b>6.8 ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DE METANO EN RUMIANTES.</b> .....	35
6.8.1 ADICIÓN DE IONÓFOROS .....	35

6.8.2	LÍPIDOS.....	35
6.8.3	TIPO DE CARBOHIDRATO.....	36
6.8.4	SELECCIÓN GENÉTICA.....	38
6.9	COMPONENTES DE VARIANZA.....	39
6.10	HEREDABILIDAD.....	39
6.11	USO DE INFORMACIÓN GENOMICA.....	39
7	MATERIAL Y MÉTODOS.....	41
7.1	<b>CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....</b>	<b>41</b>
7.1.1	COAHUILA DE ZARAGOZA.....	41
7.1.2	JALISCO.....	42
7.1.3	PUEBLA.....	43
7.1.4	VERACRUZ DE IGNACIO DE LA LLAVE.....	44
7.2	<b>METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA MEDICIÓN DE METANO.....</b>	<b>45</b>
7.3	<b>OBTENCIÓN DE MUESTRAS BIOLÓGICAS Y GENOTIPOS.....</b>	<b>49</b>
7.4	<b>CONTROL DE CALIDAD DE LOS GENOTIPOS.....</b>	<b>49</b>
8	ESTIMACIÓN DE VARIANZAS GENÉTICAS.....	50
8.1	<b>ESTIMACIÓN DE LA COVARIANZAS GENÉTICAS.....</b>	<b>52</b>
8.2	ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS GENÉTICOS.....	54
9	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
9.1	<b>EMISIONES DE METANO EN GANADO BOVINO PRODUCTOR DE LECHE.....</b>	<b>55</b>
9.2	<b>EMISIONES DE METANO EN GANADO BOVINO PRODUCTOR DE LECHE EN CUATRO SISTEMAS DE PRODUCCIÓN.....</b>	<b>56</b>
9.3	<b>ESTIMACIÓN DE VARIANZAS GENÉTICAS Y PARÁMETROS GENÉTICOS.....</b>	<b>61</b>
9.3.1	CORRELACIONES GENÉTICAS.....	63
10	CONCLUSIONES.....	64
11	ANEXO 1.- ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DE LAS UNIDADES DE PRODUCCIÓN.....	65
12	BIBLIOGRAFÍA.....	75

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1</b> Principales gases de efecto invernadero y su potencial de calentamiento global a cien años (IPCC 2007)	19
<b>Cuadro 2</b> Ecuaciones para la predicción en las estimaciones de CH <sub>4</sub>	26
<b>Cuadro 3</b> Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña en cuatro sistemas de producción de leche en México	51
<b>Cuadro 4</b> Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche en el sistema de producción intensivo de leche en México	52
<b>Cuadro 5</b> Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en sistema Lechería Familiar (LF)	53
<b>Cuadro 6</b> Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en sistema de lechería tropical especializada (LTE)	54
<b>Cuadro 7</b> Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en sistema de lechería Doble Propósito (DP)	55
<b>Cuadro 8</b> Valores de varianza genética, residual, fenotípica, y varianza aportada por grupo racial en el sistema (componentes de varianza), para la producción de metano en ganado lechero	57
<b>Cuadro 9</b> Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a sistema intensivo “La purísima”.	60

<b>Cuadro 10</b> Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Lechería Familiar “La Establo #5”	61
<b>Cuadro 11</b> Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Lechería Familiar “La Establo #6”	61
<b>Cuadro 12</b> Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Lechería Familiar “La Establo #7”	62
<b>Cuadro 13</b> Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Lechería Familiar “La Establo #8	63
<b>Cuadro 14</b> Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Lechería Tropical Especializada “Aguacatal”	63
<b>Cuadro 15</b> Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Lechería Tropical Especializada “Santa Elena”	63
<b>Cuadro 16</b> Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Doble Propósito “La Doña”	64
<b>Cuadro 17</b> Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de	64

metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Doble Propósito “La Posta”

**Cuadro 18** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Doble Propósito “El Zapato”

65

## 1 RESUMEN

Mejía Melchor Enoc Israel 2016. Estimación de componentes de varianza para la producción de metano en bovinos productores de leche. Tesis de Maestría en Ciencias de la Salud y Producción Animal, Programa de posgrado de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad universitaria CDMX. Asesores Dr. Sergio Iván Román Ponce, Dr. Everardo González Padilla, Dr. Felipe de Jesús Ruiz López. Se estimaron los componentes de varianza y parámetros genéticos para las emisiones de metano en cuatro sistemas de producción de leche en México. Se utilizaron las variables explicativas la emisión de metano ( $\text{CH}_4$ ) y la tasa de emisiones de metano por kilogramo de leche al día. La medición de las emisiones de  $\text{CH}_4$  se realizó durante a la ordeña conforme a lo descrito por Garnsworthy *et al* (2012). También se generó la información de producción promedio de leche al día (PLD), numero de lactaciones y periodo de lactación. Se obtuvieron muestras de folículos pilosos con bulbo para para la obtención de marcadores moleculares llamados Polimorfismo de un solo nucleótido (SNP). Después del control de calidad de los marcadores con el software PLINK 1.7® (Purcell, 2010) quedando 20,776 SNP disponibles, los cuales se utilizaron para la generación de la matriz de relaciones genómicas (Matriz G). Las estadísticas descriptivas para las emisiones de  $\text{CH}_4$  durante la ordeña fueron  $0.687 \pm 0.46$  mg/min y se encuentran en un rango de 0.034 a 4.074 mg/min. La producción de leche diaria fue de  $13.1 \pm 8.11$  kg y se encuentran en un rango de 1.25 a 41.61 kg. Finalmente, los valores para la razón entre emisiones de metano al momento de la ordeña y la producción diaria de leche fueron de  $0.094 \pm 0.12$  mg/kg, mismas que presentan valores entre 0.001 y 1.074 mg/min. La estimación de componentes de varianza fueron realizados mediante un modelo mixto implementado en el software ASREML 3.0® (Gilmour *et al.*, 2009). La heredabilidad calculada para emisiones de metano es de  $0.30 \pm 0.21$  así como una correlación genética positiva de  $0.874 \pm 0.54$  para las emisiones de metano y las tasa de emisiones de metano por kilogramo de leche producido. Se concluye que la implementación de programas de selección genética tiene potencial como

estrategia para la mitigación del cambio climático, ya que los resultados son permanentes, aditivos y de fácil dispersión a la población entera mediante tecnologías reproductivas.

## 2 ABSTRACT

Mejía Melchor Enoc Israel 2016. Estimation of variance components for methane production in dairy cattle. Master's Degree in Health Sciences and Animal Production, Graduate Program at the Faculty of Veterinary Medicine and Animal Husbandry, National Autonomous University of Mexico, CDMX University City. Advisors Dr. Sergio Iván Román Ponce, Dr. Everardo González Padilla, Dr. Felipe de Jesus Ruiz López. The components of variance and genetic parameters for methane emissions in four milk production systems in Mexico were estimated. The explanatory variables were the emission of methane (CH<sub>4</sub>) and the cup of methane emissions per kilogram of milk per day. Measurement of CH<sub>4</sub> emissions was performed during milking as described by Garnsworthy et al (2012). The information on average milk production per day (PLD), number of lactations and lactation period were also generated. Samples of hair follicles with bulb were obtained to obtain molecular markers called single nucleotide polymorphism (SNP). After the quality control of the markers with the PLINK 1.7® software (Purcell, 2010), 20,776 SNPs were available, which were used to generate the matrix of genomic relations (Matrix G). Descriptive statistics for CH<sub>4</sub> emissions during the Milking were  $0.687 \pm 0.46$  mg / min and ranged from 0.034 to 4.074 mg / min. Daily milk production was  $13.1 \pm 8.11$  kg and ranged from 1.25 to 41.61 kg. Finally, values for the ratio between methane emissions at the time of milking and daily milk production were  $0.094 \pm 0.12$  mg / kg, with values between 0.001 and 1.074 mg / min. The estimation of variance components was performed using a mixed model implemented in ASREML 3.0® software (Gilmour et al., 2009). The calculated heritability for methane emissions is  $0.30 \pm 0.21$  as well as a positive genetic correlation of  $0.874 \pm 0.54$  for methane emissions and methane emission rates per kilogram of milk produced. It is concluded that the implementation of genetic selection programs has potential as a strategy for the mitigation of climate change, since the results are permanent, additive and easily dispersed to the entire population through reproductive technologies.

## **ABREVIATURAS**

**ATP:** Trifosfato de adenosina

**CC:** Cambio climático.

**CGL:** Calentamiento global.

**CH<sub>4</sub> (gday):** Emisiones de metano gramos / día

**CH<sub>4</sub> (MJ/d):** Emisiones de metano por día en milijoules.

**CH<sub>4</sub>:** Metano.

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono.

**CO<sub>2</sub>-EQ:** Equivalencias en CO<sub>2</sub>.

**DMI:** consumo de materia seca.

**EI:** Efecto invernadero

**FAO:** Organización de las Naciones Unidas para los Alimentos y la Agricultura.

**GEI:** Gases de efecto invernadero.

**h<sup>2</sup>:** Heredabilidad en el sentido estricto.

**H<sub>2</sub>:** Hidrogeno

**HFCs:** Hidrofluorocarbonos.

**INIFAP:** Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

**IPCC:** Panel Intergubernamental para el Cambio Climático.

**MERM:** Emisiones de CH<sub>4</sub> durante la ordeña en mg/min

**MILKAVG:** Promedio de producción de leche.

**MILKCH<sub>4</sub>:** Emisiones de CH<sub>4</sub> con respecto al promedio de producción durante la ordeña.

**N:** Tamaño de muestra

**NLACT:** Número de lactaciones 1, 2, y 3 o más.

**NO<sub>2</sub>:** Óxido nitroso.

**PDL:** Producción diaria de leche.

**PFCs:** Perfluorocarbonos.

**POL:** Periodo de lactancia.

**SAS ®:** Statistical Analysis Software

**SDP:** Sistema doble propósito

**SF:** Sistema familiar

**SF<sub>6</sub>:** Hexafloruro de azufre.

**SI:** Sistema intensivo

**ST:** Sistema tropical especializado

**TOTALMILK:** Producción de leche total en los 15 días de muestreo.

**UP:** Unidades de producción pecuaria.

### 3 INTRODUCCIÓN.

El incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero por actividades antropogénicas se considera causante del calentamiento global. A nivel mundial existen diferentes iniciativas para mitigar los gases de efecto invernadero emprendidas por diferentes países y organismos internacionales; una de las más conocidas es el Protocolo de Kioto (1997).

Los sistemas de producción agropecuarios participan con el 4% en las emisiones de gases de efecto invernadero. Para este cálculo fueron considerados los diferentes eslabones en la cadena de generación de bienes para consumo humano: producción de forrajes y granos de consumo animal, las emisiones directas de los animales (principalmente los rumiantes) y las emisiones originadas de las excretas (FAO 2010).

La producción de CH<sub>4</sub> en los rumiantes está influenciada por factores como: consumo de alimento, composición de la dieta, digestibilidad del alimento, procesamiento previo del alimento y frecuencia de alimentación (Johnson y Johnson., 1995; Sharma., 2005).

Por ejemplo, se considera que dietas altas en fibra ocasionan incremento en la producción de CH<sub>4</sub>, mientras dietas altas en concentrado o granos tienen el efecto contrario (Boadi *et al.*, 2004). En los últimos años se han realizado estudios que estiman la producción de CH<sub>4</sub> y demás GEI con diferentes metodologías y técnicas; sin embargo el grado de incertidumbre es una de las limitantes al momento de hacer las estimaciones de GEI por lo que es necesario generar información que sea integral para la obtención de inventarios de GEI de mayor certeza en México (Bonilla y Lemus., 2012).

Diversos autores y organismos internaciones han propuesto distintas estrategias de mitigación, reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> en rumiantes, por ejemplo, reducir el número de animales rumiantes, aumentar el número de animales no rumiantes,

selección genética para baja emisión, modulación de los microorganismos ruminales metanogénicos, manipulación dietética-nutricional, y desarrollo de razas con menor índice de emisiones de CH<sub>4</sub>, entre otras estrategias de mitigación (Gerber *et al.*, 2013).

El objetivo del presente estudio fue estimar los componentes de varianza para la producción y emisión de CH<sub>4</sub> entérico en bovinos productores de leche.

## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL.**

Estimar los componentes de varianza y los parámetros genéticos para la producción de CH<sub>4</sub> en bovinos productores de leche.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

Estimar los componentes de varianza genética aditiva y ambiental, así como los parámetros genéticos para la producción de CH<sub>4</sub> en bovinos productores de leche.

Estimar los componentes de varianza genética aditiva y ambiental, así como los parámetros genéticos para la producción de CH<sub>4</sub> por litro de leche producido por día en bovinos productores de leche.

## **5 HIPÓTESIS.**

Hipótesis nula: No existe varianza genética aditiva relacionada con la producción de CH<sub>4</sub> en bovinos productores de leche.

Hipótesis alternativa: Existe varianza genética aditiva relacionada con la producción de CH<sub>4</sub> en bovinos productores de leche.

## 6 ANTECEDENTES.

### 6.1 EL CRECIMIENTO POBLACIONAL LA DEMANDA DE ALIMENTOS Y SU IMPACTO EN EL CALENTAMIENTO GLOBAL.

El incremento en la población mundial ha traído como consecuencia un aumento proporcional en la exigencia de producción de productos que cubran las necesidades humanas, entre los años 70 del siglo XX y 2015 número de personas ha pasado de 4 mil millones a 7.2 mil millones (UNFPA 2015). Se calculó que de seguir con ese patrón de crecimiento poblacional llegaremos a 9.3 mil millones de personas en el año 2050. A consecuencia de esto se debe aumentar en un 70% la producción de alimentos (Godfray *et al.*, 2011; Gerber *et al.*, 2013).

El crecimiento en la producción de carne y leche obedecen en gran medida al incremento en el tamaño de población siendo que esta modifica la demanda de productos alimenticios (Godfray *et al.*, 2011). El consumo de carne y leche anual *per cápita* mundial se calcula en 43.1 kg y 105 kg (110g y 288g por día) respectivamente, mientras que en México actual es de 58.5kg y 110kg (160 g y 301g diarios), respectivamente (OCDE-FAO 2015).

La producción mundial de carne se incrementará en más del doble, pasando de 229 millones de toneladas producidas en 1999 a 465 millones de toneladas o un 121% al año 2050 y a su vez producción de leche crecerá de 580 a 1 043 millones de toneladas. (Godfray *et al.*, 2011) siendo en este año un consumo per cápita calculado de 50kg de carne y 112.2kg de leche anuales, consumiendo diariamente 136g y 307g respectivamente calculado como media mundial (OCDE-FAO 2015).

El impacto al ambiente que implica este incremento de producción y demanda establece un nuevo reto en tiempo para el estudio y desarrollo de estrategias, para la atenuación en el desgaste de suelo, agua, vida silvestre y emisiones de GEI (IPCC 2014).

## 6.2 GASES DE EFECTO INVERNADERO.

El efecto invernadero es un fenómeno por el cual determinados gases, retienen parte de la energía que la superficie de la Tierra refleja después de ser calentada por la radiación solar (Trenberth *et al.*, 2009). Sin el efecto invernadero la temperatura media de la superficie terrestre no sería de 15°C sino de -6°C (Trenberth *et al.*, 2009; Steinfeld *et al.*, 2009).

El calentamiento global se ha incrementado debido a diferentes actividades humanas (fuentes antropogénicas) por la emisión de gases como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, entre otros (Hook *et al.*, 2010). Los GEI emitidos en los procesos de producción animal son CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O. Se estima que desde el inicio de la era industrial en el año 1750 hasta el 2009, las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O se han incrementado en la atmósfera en 38, 188 y 14 %, respectivamente, originando el calentamiento global (Steinfeld *et al.*, 2009). La temperatura promedio en la superficie de la Tierra se ha incrementado en 0.6 °C desde finales del siglo XIX (Trenberth *et al.*, 2009). Estudios recientes mostraron el impacto del calentamiento global, generando proyecciones de la temperatura promedio y su aumento de entre 1.4 y 5.8 °C para el año 2100 (Gill *et al.*, 2010).

El IPCC ha clasificado los distintos GEI de acuerdo a su potencial de calentamiento con respecto al CO<sub>2</sub> como se muestra en el Cuadro 1 (Potencial de calentamiento en un horizonte de tiempo de cien años), siendo uno de los mayor importancia el CH<sub>4</sub> por su alto potencial de calentamiento, también por ser uno de los que se encuentran en mayor frecuencia en la atmosfera terrestre.

**Cuadro 1** Principales gases de efecto invernadero y su potencial de calentamiento global a cien años (IPCC 2007)

<b>Tipo de GEI</b>	<b>PCG a 100 años</b>	<b>Formula química</b>
<b>Dióxido de carbono</b>	1	CO <sub>2</sub>
<b>Metano</b>	25	CH <sub>4</sub>
<b>Óxido nitroso</b>	298	N <sub>2</sub> O
<b>Hidrofloruro carbonados</b>	7000- 14000	HFC
<b>Hexafloruro de azufre</b>	22800	SF <sub>6</sub>

### 6.3 METANOGENESIS EN RUMIANTES

La Metanogénesis es la formación de CH<sub>4</sub> por microorganismos conocidos como metanógenos siendo el paso final en la fermentación de la biomasa en el rumen (Waghorn *et al.*, 2000; Sosa *et al.*, 2007; Hook *et al.*, 2010). Los organismos capaces de producir CH<sub>4</sub> se han identificado en el dominio *Archaea*, un grupo filogenéticamente distinto de eucariotas y bacterias (Sosa *et al.*, 2007), aunque viven en estrecha asociación con las bacterias anaeróbicas. Los metanógenos es un subgrupo de archeas (Hook *et al.*, 2010).

La metanogénesis es una vía metabólica, en la cual el paso principal en el aporte de energía se asocia a la reducción del grupo metilo a CH<sub>4</sub> (Deppenmeier, 2002). Todos los metanógenos comparten estas reacciones bioquímicas, diferenciándose en la fuente de obtención de electrones para el paso reductivo, que puede ser por la oxidación de H<sub>2</sub>, formiato, metanol, metilaminas o acetato, en dependencia del sustrato y las especies bacterianas (Guo *et al.*, 2008; Castelán-Ortega y Ku-vera 2014).

La formación de CH<sub>4</sub> no afecta los ácidos grasos de cadena corta como el acetato, propionato y butirato, ya que estos compuestos son absorbidos como nutrientes por el animal (Sosa *et al.*, 2007). El CH<sub>4</sub> producido escapa junto con otros gases, a través del eructo hacia el medio ambiente siendo el factor de emisiones de este GEI más importante en la ganadería bovina.

#### 6.3.1 MICROORGANISMOS METANOGENICOS

Los microorganismos metanogénicos, son un grupo de *arqueas* anaeróbicas estrictas que emplean generalmente el H<sub>2</sub> como donante de electrones. Hay por lo menos diez sustratos que se convierten en CH<sub>4</sub> por la acción de uno u otro metanógeno, todos los cuales liberan energía adecuada para la síntesis de ATP,

incluyendo formiato, acetato, metanol, etilmercaptano y metilamina, siendo de interés para esta revisión la vía de reducción o hidrogenación del CO<sub>2</sub> (Waghorn et al., 2000). Algunas de las especies que han sido clasificadas son: *Methanobacterium formicicum*, *M. bryantii*, *M. thermoautotrophicum*, *Methanobrevibacter ruminantium*, *M. arboriphilus*, *M. smithii*, *Methanococcus vanniellii*, *M. voltae*, *Methanomicrobium mobile*, *Methanogenium cariaci*, *M. marisnigri*, *Methanospirillum hungatei* y *Methanosarcina barkeri* (Bonilla y Lemus 2012; Dehoroty 2013).

Las metanógenos constituyen el último eslabón en la población ruminal por su papel en la regulación de la fermentación total al eliminar H<sub>2</sub> siendo el último eslabón en la cadena de la fermentación ruminal. Como ya se mencionó, la reducción de CO<sub>2</sub> con H<sub>2</sub> es el método primario por el que se produce CH<sub>4</sub> en el rumen. Sin embargo, algunas bacterias metanógenas como *Methanosarcina barkerii*, utilizan metanol, metilamina y acetato para producir CH<sub>4</sub>. Al mantener baja la concentración de H<sub>2</sub>, mediante la formación de CH<sub>4</sub>, las bacterias metanógenas promueven el crecimiento de otras especies bacterianas (Carmona et al., 2005).

La metanogénesis de los protozoarios realizada en el intestino posterior puede dar cuenta del 20 por ciento de la producción total de CH<sub>4</sub> en terneros (FAO 2013).

#### **6.4 IMPORTANCIA DE LA PRODUCCIÓN DE METANO DE LOS RUMIANTES A NIVEL GLOBAL.**

La ganadería es una de las actividades con mayor importancia en el tema de emisiones de GEI ya que se ha calculado el sector de la ganadería productora de leche aportan un 4% de las emisiones de origen antropogénico (FAO 2010), esto causado primordialmente por la fermentación entérica, almacenamiento de estiércol y producción de productos de consumo para la industria (Steinfeld *et al.*, 2009).

El CH<sub>4</sub> es uno de los gases de efecto invernadero con mayor potencial de calentamiento global y es responsable de 18% del fenómeno (Moss *et al.*, 2000; Beauchemin y McGinn 2005). Que representa el 65% de los GEI provenientes de las emisiones del sector pecuario, lo que hace del ganado vacuno el principal productor de emisiones del sector (Moss *et al.*, 2000). Según la (IPCC 2014) las cadenas de suministro ganadero emiten:

- 2 gigatoneladas de CO<sub>2</sub>-eq de CO<sub>2</sub> por año, o el 5% de emisiones de CO<sub>2</sub> antropógenas.
- 3.1 gigatoneladas de CO<sub>2</sub>-eq de CH<sub>4</sub> por año, o el 44% de emisiones de CH<sub>4</sub> antropógenas.
- 2 gigatoneladas de CO<sub>2</sub>-eq de N<sub>2</sub>O por año, o el 53% de las emisiones de N<sub>2</sub>O antropógenas.

## **6.5 LA GANADERÍA BOVINA PRODUCTORA DE LECHE EN MÉXICO.**

Dentro del subsector pecuario, la producción de bovino (carne y leche) es la más importante, ya que genera el 43% del valor total de la producción del subsector. En el caso del ganado lechero, el hato se ha mantenido estable (2.4 millones de cabezas)(SHCP 2014).

De acuerdo con el Censo Agropecuario 2007, en México existen 1.1 millones de unidades de producción de ganado bovino. El 58% de éstas son para engorda; el 34% mantienen vientres: para leche (40%), carne (32%) o doble propósito (28%); y el resto produce principalmente sementales

### **6.5.1 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE LECHE EN MÉXICO**

La república mexicana tiene una extensión territorial de 1,967,183 de km<sup>2</sup> aproximadamente (INEGI 2015), de la cual el 11% está destinada al uso de la agricultura, el 57% para agostaderos y no cultivables, el 26% a uso forestal y el 6% restante se destina a otros usos (INDETEC 2010). El inventario ganadero para el año 2013 fue de 32,402,461 cabezas de ganado, de las cuales 2,410,289 pertenecen a la producción de leche (SIAP 2016).

Existen diferentes climas dentro de la república mexicana de los cuales, aproximadamente el 25% es árido, el 20% semiárido, el 23% es templado, el 15% es trópico seco y el 12% trópico húmedo. La ganadería constituye el principal uso del suelo en el país, desarrollándose en una superficie de 113.8 millones de hectáreas, lo que representa el 58% del territorio nacional.

En el país existen alrededor de 197 millones de hectáreas, de las cuales la ganadería en sus diferentes modalidades ocupa el 58%, por lo que esta actividad representa el principal uso de suelo en el territorio (INEGI 2016).

México es el octavo consumidor de leche y productos lácteos a nivel mundial (FAO 2016), haciendo hincapié que es un país deficitario siendo que en los últimos 10 años las importaciones han representado entre 27% y 34 (SAGARPA 2015). El nivel de tecnificación y capacidad para la producción de leche, así como el manejo de las UP determinaran el tipo de sistema perteneciente, siendo cuatro los existentes en la república: Sistema Intensivo, Sistema Familiar, Sistema tropical especializado, y el Sistema de doble propósito (SARGARPA 2010).

### **6.5.2 SISTEMA INTENSIVO**

El sistema intensivo se caracteriza por tener tecnología altamente especializada, y predomina el manejo de los animales en corrales (estabulado). Los animales se alimentan con dietas calculadas con base en su requerimiento nutrimental, además que en los establos encontramos animales especializados de raza Holstein que han sido sometidos a programas de mejoramiento genético (Núñez *et al.*, 2014). El proceso de ordeña se realiza a través de maquinaria especializada, principalmente se desarrolla en el altiplano y las zonas áridas y semiáridas del norte de México (SAGARPA 2015).

Siendo los principales estados productores en orden de importancia, Durango, Coahuila, Guanajuato, Jalisco, Aguascalientes, Chihuahua, México, San Luis Potosí, Hidalgo, Querétaro y Baja California (SAGARPA 2010).

En estudios anteriores se ha calculado que animales alimentados con dietas balanceadas altas en concentrados son animales que emiten cantidades menores de CH<sub>4</sub> por su alta eficiencia metabólica. Por lo que se espera que este sistema sea el que tenga las menores emisiones de CH<sub>4</sub> a comparación de los otros sistemas de producción (Boadi *et al.*, 2004).

### **6.5.3 SISTEMA FAMILIAR**

El sistema de producción familiar se caracteriza principalmente por tener hatos ganaderos pequeños que oscilan entre 3 a 30 animales adicionando las hembras destinadas a reemplazo, el manejo nutricional, productivo, y reproductivo involucra primordialmente a toda la familia, regularmente es un sistema precario de tecnología y prácticas de sanidad animal, programas de reproducción y mejoramiento genético. El jefe de familia es el productor de los sistemas tradicionales y aprovechan en forma importante los esquilmos de la agricultura local (rastros de maíz, sorgo y trigo) (Román *et al.*, 2009)

Pueden ser de tipo estabulado o semi estabulado, de acuerdo a las condiciones del campo de producción de forraje. Los animales de las razas Holstein y en menor proporción el Suizo Americano y cruza. El mercado de la producción de leche llega a ser con frecuencia mercados locales, este sistema se desarrolla predominantemente en los estados de Jalisco, México, Michoacán, Hidalgo, Sonora, Aguascalientes, Baja California, Coahuila, Chihuahua, Distrito Federal, Durango, Nuevo León y Sonora (Vera *et al.*, 2009).

#### **6.5.4 SISTEMA TROPICAL ESPECIALIZADO.**

El sistema tropical especializado se caracteriza por tener animales en producción preferentemente de raza pura por ejemplo la raza Holstein y Pardo Suizo, esto con el fin de aumentar significativamente la capacidad de producción con respecto al sistema de doble propósito. Este sistema cuenta con una tecnificación y manejo más estrictos comparados con el sistema de producción de leche familiar empleando ordeñas mecanizadas individuales, al igual que en el sistema de doble propósito los animales son de alimentación en pastoreo rotacional, con suplementación alimenticia en el momento del ordeño, sin llegar a los niveles de producción y duración de las lactancias del sistema especializado. En este sistema el manejo sanitario y zootécnico es similar al del sistema intensivo, contemplando, inseminación artificial, calendarización de partos, así como planeación y calendario de vacunas, amamantamiento restringido retirando la cría 3 días después del parto (Calderon *et al.*, 2007).

### 6.5.5 SISTEMA DE DOBLE PROPOSITO

El sistema de producción de doble propósito se lleva a cabo en el trópico con vacas cruzadas (Magaña *et al.*, 2006; Martínez *et al.*, 2012). Esta diversidad productiva también ha permitido que se desarrollen sistemas comerciales de la leche fresca con características particulares dependientes del manejo de los hatos y de la región de México dónde se localicen. Una característica importante de la ganadería de doble propósito en trópico es la flexibilidad de su función zootécnica, al producir leche por medio del ordeño y carne por el amamantamiento de los becerros (Ruíz *et al.*, 2008; Román *et al.*, 2009).

Los animales utilizados en la producción en este sistema principalmente son ganado *Bos taurus taurus* cruzados con *Bos taurus indicus*. Se desarrolla en las zonas tropicales, se puede encontrar en entidades con clima árido, semiárido y templado (Román-Ponce *et al.*, 2013).

Los estados que cuentan con el mayor número de vientres en producción bajo este sistema son Chiapas, Veracruz, Jalisco, Guerrero, Guanajuato, Tabasco, Zacatecas Nayarit, San Luis Potosí y Tamaulipas (SAGARPA, 2000). Este sistema también se puede observar en Sinaloa, Coahuila, Oaxaca, Campeche, Puebla, Durango, Colima, Yucatán, Hidalgo, Quintana Roo, Morelos, Nuevo León, Querétaro y Baja California Sur (Gallardo *et al.*, 2010).

## 6.6 CUANTIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE METANO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN BOVINA

La necesidad de cuantificar las emisiones de CH<sub>4</sub> para la búsqueda de estrategias de mitigación integral y efectiva, ha llevado al desarrollo de nuevas técnicas y metodologías, para la cuantificación de las emisiones y diseño de ecuaciones para la estimación de las emisiones de CH<sub>4</sub>.

Adicionalmente, se integra la información generada en laboratorio a través de la descomposición de la dieta y datos recopilados en campo como lo han informado Garnsworthy *et al.*, 2012a y 2012 b. El Cuadro 2 muestra algunas de las ecuaciones derivadas de diversos trabajos publicados.

**Cuadro 2** Ecuaciones propuestas por diversos autores para la predicción de las emisiones de metano por bovinos en diferentes sistemas de producción.

Fuente	Ecuación
Blaxter y Clapperton(1965)	$CH_4(\text{gday}^{-1})=[1.3+0.112 \times (\text{EDm, \%ofGE}) + \text{MN} \times (2.37 - 0.050 \times (\text{EDm, \%of GE}))] / 100 \times \text{GEI}(\text{MJday}^{-1}) / 0.05565$
Corré (2002)	$CH_4(\text{gday}^{-1})=[150 + 0.01 \times \text{Milk yield}(\text{kgday}^{-1}) \times 365] / 365 \times 1000$
Giger-Reverdin <i>et al.</i> (2003)	$CH_4(\text{gday}^{-1})=[45.0 - 0.018 \times \text{DMI}(\text{gkg}^{-1}\text{BWday}^{-1})^2 - 1.8 \times \text{C}18:2(\% \text{DM}) - 8.2 \times \text{C} > 20(\% \text{DM})] \times \text{DMI}(\text{kgday}^{-1}) \times 0.6802$
IPCC (1997)Tier I	CH <sub>4</sub> (gday <sup>-1</sup> )=323 for North America, 274 for Europe (general) and 279 for the Netherlands
IPCC (1997)Tier II	$CH_4(\text{gday}^{-1})=[0.06 \times \text{GEI}(\text{MJday}^{-1})] / 0.05565$
Kirchgebner <i>et al.</i> (1995 ,a)	$CH_4(\text{gday}^{-1})=63 + 79 \times \text{CF}(\text{kgday}^{-1}) + 10 \times \text{NFE}(\text{kgday}^{-1}) + 26 \times \text{CP}(\text{kgday}^{-1}) - 212 \times \text{Fat}(\text{kgday}^{-1})$
Kirchgebner <i>et al.</i> (1995, b)	$CH_4(\text{gday}^{-1})=10 + 4.9 \times \text{Milk yield}(\text{kgday}^{-1}) + 1.5 \times \text{BW}(\text{kg})^{0.75}$

---

Moe yTyrrell (1979)	$CH_4(\text{gday}^{-1}) = [3.41 + 0.511 \times \text{NSC}(\text{kgday}^{-1}) + 1.74 \times \text{HC}(\text{kgday}^{-1}) + 2.65 \times \text{CEL}(\text{kgday}^{-1})] / 0.05565$
Schilset <i>et al.</i> (2006)	$CH_4(\text{gday}^{-1}) = 20 \times \text{Concentrate intake}(\text{kg as fedday}^{-1}) + 22 \times \text{Corn silage intake}(\text{kg DMday}^{-1}) + 27 \times \text{Grass intake}(\text{kg DMday}^{-1})$
Garnsworthy <i>et al</i> (2012)	$CH_4(\text{g/day}) = 252 + 57.2 \times \text{Emisiones de CH}_4 \text{ durante la ordeña}(\text{g/min})$
Bannink <i>et al</i> (2011, a, b)	$CH_4(\text{g/d}) = \text{feed intake}(\text{kg of DM/d}) \times 18.4(\text{MJ/kg of DM}) / 0.05565(\text{MJ/g}) \times 0.06 \times \{1 + [2.38 - \text{level of intake}(\text{multiples of maintenance level})] \times 0.04\}^\circ$
	$CH_4(\text{g/d}) = [\text{grass or grass silage}(\text{kg of DM/d}) \times 21.0(\text{g/kg of DM}) + \text{concentrates}(\text{kg of DM/d}) \times 21.0(\text{g/kg of DM}) + \text{corn silage}(\text{kg of DM/d}) \times 16.8(\text{g/kg of DM})] \times \{1 + [2.38 - \text{level of intake}(\text{multiples of maintenance level})] \times 0.04\}^\#$

---

Cuadro tomado de Ellis *et al* 2010 y modificado con nueva información.

## **6.7 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE METANO ENTÉRICO EN RUMIATES**

### **6.7.1.1 TÉCNICAS CERRADAS.**

En la actualidad las técnicas calorimétricas de respiración más utilizadas son: cámaras cerradas, cajas en la cabeza, o capuchas ventiladas y máscaras, las cuales han hecho factible la determinación de las emisiones de CH<sub>4</sub> (Storm *et al.*, 2012;Brouček., 2014;).

El principio utilizado para la determinación de emisiones es la medición del flujo total de aire por el sistema y la diferencia en la concentración de CH<sub>4</sub> entre el aire inspirado y espirado. En las cámaras cerradas la mayor ventaja radica en que mediciones de CH<sub>4</sub> incluyen tanto el proveniente de la fermentación ruminal como el de la fermentación del tracto posterior. Las desventajas de este método son los costos de construcción y de mantenimiento de las cámaras y la restricción de movimiento y estrés que se ocasiona en los animales estudiados, además del costo de la mano de obra para su operación (Carmona *et al.*, 2005).

El sistema de circuito cerrado implica mayor costo, por lo que los sistemas de cámaras en circuito abierto son las que han sido utilizadas en el mayor número de estudios (Chagunda *et al.*, 2011; Tormenta *et al.*, 2012.).

La emisión de CH<sub>4</sub> se calcula a partir de la diferencia entre la cantidad entrante y saliente de CH<sub>4</sub> y expresa la emisión calculada (Muñoz *et al.*, 2012). Se utiliza un analizador multigas con capacidad para la medición de CH<sub>4</sub> y otros gases como dióxido de carbono, y oxígeno (Pinares-Patino *et al.*, 2008a; Chagunda *et al.*, 2011).

### **6.7.2 TÉCNICAS CON RUMEN ARTIFICIAL O IN VITRO**

Los estudios de fermentación y digestión juegan un papel crucial en los estudios nutricionales y fisiológicos en rumiantes. Desde la década de los cincuenta muchos métodos han sido desarrollados para simular el ecosistema ruminal. Aunque los estudios *in vivo* han sido de gran importancia, las simulaciones *in vitro* del medio ambiente ruminal son frecuentemente efectivas y eficientes por su rapidez y bajo costo de operación. Además, porque se pueden definir factores específicos, que en condiciones *in vivo*, pueden ocultarse por una gran complejidad de factores (Carmona *et al.*, 2005).

Dentro de las técnicas más conocidas *in vitro* están la de Tilley y Terry implementada en 1963, o sus diversas modificaciones, que han sido muy usadas debido a su alto grado de precisión y alto grado de correlación entre los datos obtenidos con estas técnicas y la digestibilidad calculada *in vivo*. Entre algunas desventajas de estos métodos se tienen: largo tiempo requerido para realizar un análisis, la gran cantidad de pasos que requieren y que la muestra no tiene flujo de recambio.

En la década de los setentas se desarrollaron dos de los sistemas de flujo continuo con mayor uso por los investigadores (Kurihara *et al.*, 1999): el “sistema de cultivo de flujo continuo doble” originalmente desarrollado en 1976 (Hoover *et al.*, 1976) y el “Rusitec” desarrollado en 1977 (Czerkawski y Breckenridge, 1977). El “*Rumen artificial (RUSITEC)*” hace parte de las técnicas *in vitro*, con modificaciones que permiten una mayor similitud a las características del ecosistema ruminal. *RUSITEC* es en términos generales un equipo que normalmente consiste de ocho sistemas de flujo continuo donde interactúan la fase líquida y sólida del rumen (obtenida del rumen de animales donadores), las muestras a analizar (confinadas en bolsas de nylon) y un sistema buferante o de saliva artificial que permite en el sistema un control del pH, a través de carbonatos y fosfatos ( Volkshuisvesting y Ordening., 2003; Bhatta *et al.*, 2007; Storm *et al.*, 2012)

Esta última metodología ha demostrado una adecuada correlación con los datos obtenidos *in vivo*, involucrando como ya se mencionó, mayor rapidez y menos costos, además de una mayor independencia de animales canulados. Una de las limitaciones del uso de esta técnica es que cada autor reporta el diseño del equipo, las condiciones de operación y la metodología, pero no existe un manual unificado, debido a que no es un equipo comercialmente disponible.

### **6.7.3 TÉCNICAS CON TRAZADORES**

Las primeras técnicas de trazadores de CH<sub>4</sub> son pruebas altamente limitadas ya que involucraban el uso de isótopos de CH<sub>4</sub> los cuales eran en muy difíciles de conseguir, aunado a que estos no son muy estables al CH<sub>4</sub> ruminal y por su baja solubilidad dificultaba la preparación (Carmona *et al.*, 2015). Estos trazadores ocupados eran [<sup>3</sup>H-] CH<sub>4</sub> o [<sup>14</sup>C-]. Los cuales eran puestos a disposición en el rumen a través de canulas previamente implantadas en el animal (Bonilla y Lemus., 2012; Carmona *et al.*, 2015).

Técnicas alternativas de determinación de CH<sub>4</sub> fueron desarrolladas por Johnson y Johnson en 1995, y estas ocupan SF<sub>6</sub> en su mayoría por su estabilidad y fácil adquisición, solo que resulta ser una limitante para este trazador ser uno de los GEI con mayor potencial de calentamiento, siendo 22 800 mayor que el CO<sub>2</sub>. Con estos trazadores se puede hacer más que la estimación de CH<sub>4</sub> si no todo un perfil de gases producidos en el rumen. Se coloca una cabezada que sostiene un capilar sobre el morro, a través del cual se colecta muestra de aire expirado y éste es almacenado en un tubo al vacío colocado alrededor del cuello del animal. Posterior a la colección de aire expirado, el tubo se presuriza con nitrógeno y se determinan las concentraciones de SF<sub>6</sub> y CH<sub>4</sub> por cromatografía (Bonilla y Lemus, 2012).

## **6.7.4 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE METANO *IN SITU* E *IN VIVO***

### **6.7.4.1 GUARDIAN PLUS**

Garnsworthy *et al.* (2012a) desarrolló una técnica basada en el muestreo de aire liberada por eructos durante el ordeño. Los analizadores de CH<sub>4</sub> están instalados en las estaciones de ordeño y los eructos son cuantificados en frecuencia e intensidad con pulsos eléctricos de mili amperes.

El eructo liberado es utilizado para calcular las emisiones de CH<sub>4</sub>, los robots (Guardian plus) muestrean continuamente la atmosfera de comedero, a través de un tubo de metileno de 8 mm de diámetro, aproximadamente 3 m longitud, y conectado al puerto de entrada de gas, donde hay un analizador de CH<sub>4</sub> que ocupa rayos infrarrojos con un rango de 0 a 10,000 mg.kg<sup>-1</sup> generando pulsos eléctricos que se traducen en el registro de CH<sub>4</sub> por eructo.

Los mismos autores (Garnsworthy *et al.*, 2012b) registraron emisiones de CH<sub>4</sub> de las vacas durante el ordeño utilizando analizadores de CH<sub>4</sub> instalados en las estaciones de ordeño automático, modificado como cámara de respiración. Las concentraciones de CH<sub>4</sub> en el aire liberado por eructos se medirán de forma continua en cada ordeño y los datos eructos se utilizan para calcular las medias diarias individuales para el CH<sub>4</sub>. (Garnsworthy *et al.*, 2012 a y b)

### **6.7.4.2 PISTOLA DE RAYO LASER TRAZADOR DE METANO**

En 2013 se desarrolló una técnica que ocupa una pistola de rayo laser para la determinación de CH<sub>4</sub> eructado, esta técnica consiste en apuntar hacia el morro del animal y el dispositivo recolecta la concentración de CH<sub>4</sub> en el eructo del animal (Chagunda *et al.* 2013). Esta técnica tiene como limitante la variación en las mediciones de acuerdo al cambio de ángulo entre el dispositivo laser y la posición del animal de estudio.

## **6.8 ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DE METANO EN RUMIANTES.**

### **6.8.1 ADICIÓN DE IONÓFOROS**

La adición de ionóforos, particularmente la monensina, puede reducir el consumo de alimento entre un 5-6%, la relación acetato: propionato y las emisiones de CH<sub>4</sub> (Moss *et al.*, 2000; Johnson y Johnson., 1995). La reducción en las emisiones de CH<sub>4</sub> en animales suplementados con ionóforos es probable que se relacione con la reducción en el consumo de alimento (cuando es de alta calidad), debido al incremento en la eficiencia fermentativa y no por un efecto directo en las poblaciones metanógenas (Pinos y Gonzales., 2008). En este sentido, los ionóforos no son inhibidores directos de las bacterias metanógenas. Estos, lo que hacen es restringir la producción de hidrógeno y por ende la formación de CH<sub>4</sub>.

### **6.8.2 LÍPIDOS**

Se señala que los lípidos en la dieta de los rumiantes afecta la producción de CH<sub>4</sub> por diversos mecanismos, incluyendo la biohidrogenación de los ácidos grasos insaturados, el aumento en la producción de ácido propiónico y la inhibición de protozoos (Johnson y Johnson, 1995). Se ha demostrado que la adición de ácidos grasos insaturados de cadena larga disminuye la metanogénesis porque se convierte en una alternativa metabólica para el hidrógeno.

Sin embargo, la cantidad total de hidrógeno usado en los procesos de biohidrogenación de los ácidos grasos insaturados endógenos es pequeña (1%) comparado con el que es usado para la reducción de CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> (48%), la síntesis de AGV (33%) y la síntesis bacteriana (12%). Una proporción de bacterias metanógenas es endo y ectosimbióticas con los protozoos. Por lo tanto, la reducción del número de protozoos aparentemente contribuye a una declinación

en la población de metanógenas , además se supone que la toxicidad de algunos ácidos grasos de cadena larga y media sobre las bacterias metanógenas también tiene un efecto negativo ( Bonilla y Lemus, 2012; Gómez *et al.*, 2012; Brouček., 2014).

La inclusión de sebo de res (34 g de grasa kg MS-1) en dietas con base en ensilado de cebada para vaquillas Angus en crecimiento, redujo en 14 % la emisión de CH<sub>4</sub>, sin reducir el consumo de alimento. La adición de 3 % de lípidos de origen animal a dietas altas en forrajes disminuye la emisión de CH<sub>4</sub>, también toma en cuenta los efectos potencialmente negativos en el consumo de energía digestible y en el comportamiento de ganado alimentado con dietas altas en forrajes por su cambio en la palatabilidad (Beauchemin *et al.*, 2007; Bonilla y Lemus 2012) siendo de conocimiento general que las modificaciones e implementación de este tipo de estrategias para el cambio en las emisiones de GEI solo suponen una solución temporal, que en ausencia de este tipo de manejo la fermentación ruminal retornará su estado normal.

### **6.8.3 TIPO DE CARBOHIDRATO**

El principal componente en la producción de CH<sub>4</sub> es el tipo de carbohidrato y la tasa de fermentación. El tipo de carbohidrato fermentado afecta la producción de CH<sub>4</sub> probablemente a través de impactos en el pH y la población microbial. Así, la fermentación de los carbohidratos fibrosos producen una relación de acetato: propionato y una producción de CH<sub>4</sub> ( Carmona *et al.*, 2005; Bonilla y Lemus 2012). Pero dependiendo de la tasa de degradación de la fibra y del consumo relacionado, la producción de CH<sub>4</sub> varía. Este aspecto se evidencia en algunos subproductos de destilería que tienen buena cantidad de fibra, pero de buena digestibilidad, resultando en disminuciones en la producción de CH<sub>4</sub>(Fernando *et al.*, 2010).

Las dietas altas en almidón se favorece la producción de propionato y se disminuye la relación CH<sub>4</sub>/materia orgánica fermentada en el rumen (Moss *et al.* 2000). Como se mencionó, el efecto de estas dietas sobre el pH ruminal puede explicar la disminución en las emisiones de CH<sub>4</sub>. Hay menor producción de CH<sub>4</sub> con dietas ricas en almidones que con dietas ricas en fibra ;, también se indica que se genera una disminución en la producción de CH<sub>4</sub> cuando se incrementa el consumo de fuentes energéticas (Chandramoni *et al.*, 2002). Las fermentaciones propiogénicas son comunes en los sistemas de alimentación donde se suministran altas cantidades de concentrados (Bonilla y Lemus, 2012).

#### 6.8.4 SELECCIÓN GENÉTICA

La disminución de las emisiones en ganado mediante la selección genética ha sido una estrategia estudiada en años recientes, se propone tener cambios permanentes y aditivos en las futuras generaciones al contrario de las estrategias ocupando la alimentación que son temporales (Boadi *et al.*, 2004; Haas *et al.*, 2011).

La finalidad de la evaluación genética es identificar los mejores animales, de entre todos los candidatos a la selección, que serán los progenitores de la próxima generación. El éxito de cualquier programa de mejora depende, fundamentalmente, de la precisión con que seamos capaces de evaluarlos. Cuanto más se aproxime la predicción del valor genético de los animales a su valor real, mayor será la respuesta obtenida a la selección a igualdad del resto de los parámetros (Gonzales *et al.*, 2007).

En un estudio reciente, se estimó la producción de CH<sub>4</sub> en ganado bovino entre 280 a 450 g/día (Garnsworthy *et al.*, 2012a y 2012b ; deHaas *et al.*, 2011). La producción estimada de CH<sub>4</sub> presenta una heredabilidad de 0.30 en bovinos de la raza Holstein (de Haas *et al.*, 2011).

## **6.9 COMPONENTES DE VARIANZA**

La teoría de los componentes de varianza ha sido discutida desde Fisher en 1925 haciendo propuestas de cómo descomponer la varianza en sus diferentes componentes y también ha sido discutida anteriormente (Crump 1946; Eisenhart 1947; Crump 1951).

Los componentes de la varianza evalúan la cantidad de variación atribuible a cada fuente de error de medición (Henderson, 1953), más la contribución de variabilidad entre las partes. La suma de los componentes de varianza individuales es igual a la variación total (Eisenhart, 1947)

## **6.10 HEREDABILIDAD**

La  $h^2$  representa la proporción de la varianza fenotípica observada debida a efectos genéticos, esta expresa la proporción de la varianza total atribuible a las diferencias de los valores genéticos aditivos( Falconer, 1989; Lynch y Walsh., 1998). La  $h^2$  expresa la relación del valor fenotípico como guía de valor genético aditivo, el cual determina su influencia en la próxima generación (Falconer 1989)

## **6.11 USO DE INFORMACIÓN GENÓMICA**

Actualmente se disponen diferentes plataformas para genotipificar los marcadores moleculares en altas densidades como SNP (Meuwissen *et al.*, 2001) La predicción genómica explica de manera efectiva gran cantidad de variación genética para una característica. Los modelos lineales ocupan la información genómica con una adaptación del BLUP (Mejor predictor lineal insesgado por sus siglas en inglés).

La modificación de BLUP se ocupa la matriz de relaciones genómicas en lugar de la matriz de relaciones derivada del pedigrí, este método se le denomina GBLUP (Hayes *et al.* 2009). El método del GBLUP asume una distribución normal para los efectos de los SNP, lo que es equivalente a asumir que existe un gran número de mutaciones con efectos muy pequeños (Ober *et al.*, 2011; Zambrano *et al.* 2015).

El GBLUP considera que todos los SNP tiene un pequeño efecto y este efecto se encuentra distribuido de manera normal y con varianza constante por lo que es posible la modificación de los modelos mixtos convencionales (Zambrano *et al.* 2015).

## **7 MATERIAL Y MÉTODOS**

### **7.1 CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.**

El presente estudio se realizó en cuatro estados de la república (Coahuila, Jalisco, Puebla y Veracruz), contando con 317 animales en total. Estos repartidos en los diferentes sistemas de producción y hatos del estudio.

#### **7.1.1 COAHUILA DE ZARAGOZA**

La obtención de información se realizó en la unidad de producción “La Purísima” y se encuentra en el municipio de Matamoros Coa. y cuenta con una superficie de 1,179.19 kilómetros cuadrados, equivalente al 5% de la superficie del estado y al 0.06% de la nacional (INEGI 2013; SAGARPA y INEGI 2009).

La altura media es de 1,600 metros sobre el nivel del mar. El clima es de transición a semi-húmedo, templado, con una temperatura máxima de 39° C y una mínima de -12° C., La tasa media anual es de 16° C. Este municipio tiene una precipitación pluvial media anual de 469.9 milímetros, con un promedio anual de 72 días de lluvia y una humedad relativa del 48%. El viento dominante es del suroeste (INEGI 2015).

La unidad de producción cuenta con 360 animales de los cuales se obtuvo información de 37 vacas en producción con un promedio de producción de leche diaria (PDL) de 24 kg (Cuadro 9, Anexo 1), con dietas balanceadas en estabulación, con dos ordeñas al día.

### **7.1.2 JALISCO**

Las unidades de producción son de particulares y se encuentran en el municipio de Tepatitlán de Morelos Jal. y cuenta con una superficie de 1532.78 kilómetros cuadrados que representan el 1.78 % de la superficie del estado (INEGI 2013; SAGARPA y INEGI 2009).

La altura promedio es de 1,800 metros sobre el nivel del mar, y tiene un clima que varía entre los 16° a 22°C con un promedio de precipitación pluvial que oscila en rango de 700 – 1 100 mm anuales, cuenta con un clima templado sub húmedo con lluvias en verano, de humedad media (54.53%) (CONABIO 2011).

Se obtuvo información de 104 vacas en producción, pertenecientes a 4 hatos lecheros, con un PDL de 15.94 lts (Cuadro 9, Anexo 1), y estas son alimentadas con rastrojos y concentrados comerciales, estas son ordeñadas dos veces al día.

### 7.1.3 PUEBLA

La zona del estudio correspondiente al estado de Puebla se encuentra en la Región II Sierra Nororiental perteneciente al municipio de Hueytamalco. El estado se ubica en la parte centro este del país; tiene una superficie de 34 290 km<sup>2</sup>, que representa el 1.7 % del espacio total nacional (CONABIO 2011).

Las unidades de producción de las que se obtuvo información fueron hatos pertenecientes al sitio experimental “Las Margaritas”, Municipio de Hueytamalco, Puebla. El sitio está ubicado en la sierra nororiente del estado la característica orográfica del municipio es un constante e irregular descenso en dirección Sur-Norte; la altura del municipio oscila entre 250 y 1,700 metros sobre el nivel del mar y presenta clima subtropical húmedo-semi cálido Af(c). La temperatura promedio anual es de 20.8°C, la mínima de 15.3°C en invierno, y la máxima es de 24.2°C en verano.( INEGI 2009; Ríos *et al.*, 2010)

#### **7.1.4 VERACRUZ DE IGNACIO DE LA LLAVE**

La zona del estudio correspondiente al estado de Veracruz de Ignacio de la Llave se encuentra en las llanuras del sotavento pertenecientes al municipio de Medellín de Bravo. (INEGI 2014).

Las unidades de producción donde se realizó el estudio fueron rancho “El Zapato” (iniciativa privada), y Campo Experimental “La Posta” perteneciente al INIFAP, Ambas unidades de producción se localizan en el municipio de Medellín de Bravo, Veracruz a una altura de 52 metros sobre el nivel del mar. El clima se clasifica como cálido-húmedo-extremoso con una temperatura promedio de 25.3 C. La precipitación pluvial media anual es de 1,417.8 mm (INEGI 2015).

## 7.2 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA MEDICIÓN DE METANO

La medición de CH<sub>4</sub> se realizó durante a la ordeña conforme a lo descrito por Garnsworthy *et al.*, (2012). La emisión de CH<sub>4</sub> fue medida a través de sensores infrarrojos especializados con un rango de medición de 0 – 10,000 mg/kg.

El sensor cuenta con una bomba de vacío que servirá para monitorear constantemente el aire o las aspiraciones emitidas por los animales en el ordeño. El eructo fue muestreado por una línea de muestreo localizada en el comedero, a una distancia máxima de 3 metros del sensor. Idealmente, esta línea de muestreo estará lo suficientemente cerca de los orificios nasales y el hocico de la vaca de manera que cada emisión sea muestreada; esta línea de succión contará con dos sistemas de filtrado para evitar el paso de residuos sólidos y líquidos que puedan de alguna manera afectar la medición de gases, el sensor también cuenta con un tubo de escape el cual está retirado a 50 cm para evitar el reciclamiento de gases provocándose así alteraciones en la medición Garnsworthy *et al.*, 2012a; Bell *et al.*, 2014).

El sensor transforma las concentraciones de CH<sub>4</sub> en pulsos eléctricos los cuales quedarán registrados. Este sistema tiene capacidad de almacenar hasta 7 días de información, en intervalos de 1 segundo; el mismo contiene un programa para poder obtener dicha información

Se calibró el sensor al iniciar las mediciones y posteriormente se realizó este paso cada 8 días, para evitar datos erróneos y corregir riesgos. Como el programa de interpretación de los datos será calibrado, este paso servirá como un factor de ajuste y conservará la medición de CH<sub>4</sub> de cada vaca que pasé a la sala de ordeño durante la realización del experimento. Lo anterior se muestra en las Figuras 1, 2,3 y 4.



**Figura 1. Toma de muestra de la atmosfera del comedero en la unidad de producción “La Doña” del sistema Doble Propósito, mostrando los sensores Guardian Plus.**



**Figura 2. Toma de muestra de la atmosfera del comedero en la unidad de producción “Establo 7” del sistema Lechería Familiar, mostrando los sensores Guardian Plus.**



**Figura 3. Instalación de Sensor Guardian Plus y adaptación de comedero en el sistema de Lechería Intensiva.**



**Figura 4 Toma de muestra de la atmosfera del comedero en la unidad de producción “Establo 7” del sistema Lechería Familiar, mostrando los sensores Guardian Plus.**

### **7.3 OBTENCIÓN DE MUESTRAS BIOLÓGICAS Y GENOTIPOS**

Se obtuvieron las muestras de DNA mediante pelos con folículo piloso que se procesaron asegurando la integridad óptima del folículo. Las muestras se enviaron al laboratorio para la obtención de los genotipos con ayuda de marcadores moleculares (SNP). Se utilizaron dos plataformas biotecnológicas; la primera fue el micro arreglo GGP BOVINE LD V4 y la segunda GGDP BOVINE 150K con 30,125 y 138,962 SNP, respectivamente.

### **7.4 CONTROL DE CALIDAD DE LOS GENOTIPOS**

Durante el proceso de control de calidad se realizaron las siguientes pruebas utilizando el software PLINK 1.7 (Purcell, 2010) y solo se utilizaron los SNP ubicados en los 29 cromosomas autosómicos. El control de calidad consto en la realización de tres pruebas mediante tres opciones:

- 1.- MIND (Missingness per individual). Esta prueba calcula los marcadores perdidos y se removieron individuos con menos del 90% de la información genotípica,
- 2.- MAF (Minor allele frequency). La cual consiste en calcular la frecuencia del alelo menos común en un determinado locus dentro de la población, y fueron eliminados los animales con un valor menor a 5% de la información con los marcadores.
- 3.- GENO (Missingness per marker) que es el conteo de animales que se remueven por marcadores con una proporción menor de 90% de marcadores útiles.

Al final del control de calidad y la identificación de marcadores en ambas plataformas el número de marcadores disponibles fue de 20,776 SNP en un total de 317 individuos.

## 8 ESTIMACIÓN DE VARIANZAS GENÉTICAS

Para la estimación de componentes de varianza de emisiones de metano (MERM) y la tasa de emisiones de metano por kilogramo de leche; se utilizó la metodología de modelos mixtos usando un modelo animal:

Se sustituyó la matriz de relaciones numéricas (Matriz A) por la matriz de relaciones genómicas (Matriz G).

La matriz G se calculó conforme a la metodología descrita por Van Raden 2008 mediante la siguiente fórmula:

$$G = \frac{ZZ'}{2\sum p_i(1-p_i)} \quad (1)$$

Donde G es la matriz de relaciones genómicas, 1 es un vector de unos,  $p_i$  es la frecuencia del segundo alelo en el locus, Z es la matriz que describe qué genotipo hereda cada individuo. La Matriz Z contiene tantas líneas como individuos, así como tantas columnas como SNP.

En este estudio el número de animales con información genómica excede el número de covariables marcadores usados para calcular la matriz G; lo que resultó en una matriz G singular. La alternativa presentada para solventar esta situación fue multiplicar la matriz G por un vector de escalares de 1 obteniendo de este modo una matriz G no singular (Fernando *et al.*, 2016).

El modelo utilizado se utilizó para ambas variables explicativas (MILKCH<sub>4</sub>, y CH<sub>4</sub>), y los análisis para la estimación de componentes de varianza fueron calculados a través del software ASREML 3.0® (Gilmour *et al.*, 2009), quedando el modelo de la siguiente manera.

$$y = Xb + Z_1a + Q_1n + \varepsilon \quad (2)$$

Donde:

Y= vector de mediciones de MERM y MILKCH4.

b= vector de efectos fijos (número de lactaciones y periodo de lactación).

X= Matriz de incidencia para los efectos fijos.

a= Efecto aleatorio del animal  $\sim N(\mathbf{0}, G\sigma_a^2)$ .

G=Matriz de relaciones genómicas.

Z<sub>1</sub> = Matriz de incidencias los efectos aleatorios del animal.

Q<sub>1</sub> = Matriz de incidencias para el efecto de aleatorio del grupo racial anidado dentro de sistema de producción (S\_GR).

n= Efecto aleatorio del sistema de producción que anida la variación causada por la composición racial.

$\varepsilon$  = vector de residuales del modelo.

## 8.1 ESTIMACIÓN DE LA COVARIANZAS GENÉTICAS

Para la estimación de componentes de covarianza entre MERM, y MILKCH<sub>4</sub> se utilizó un modelo animal bivariado, donde también se sustituyó la matriz de relaciones numéricas (Matriz A) por la matriz de relaciones genómicas (Matriz G), la cual se estimó conforme a la fórmula 1 previamente descrita. El modelo de efectos fijos fue el mismo que se utilizó para los análisis univariados (2).

Finalmente, el modelo bivariado utilizado para estimación la estimación de componentes de covarianza implementado en ASREML 3.0 ® (Gilmour *et al.*, 2009), quedando el modelo de la siguiente manera.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ 0 & X_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_1 & 0 \\ 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_1 & 0 \\ 0 & Q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dónde:

Y<sub>1</sub>= Vector de emisiones de CH<sub>4</sub> (mg/min)

Y<sub>2</sub>=Vector de medias de producción de CH<sub>4</sub> por producción de leche por día (kg).

b<sub>1</sub> y b<sub>2</sub>= Vector de efectos fijos (número de lactaciones y periodo de lactación).

X<sub>1</sub> y X<sub>2</sub>= Matriz de incidencia para los efectos fijos.

Z<sub>1</sub> y Z<sub>2</sub>= Matriz de incidencias de efectos aleatorios del animal.

a<sub>1</sub> y a<sub>2</sub>= Efecto aleatorio del animal ~ N (0, Gσ<sub>a</sub><sup>2</sup>).

G = Matriz de relaciones Genómicas.

Q<sub>1</sub> y Q<sub>2</sub> = Matriz de incidencias para el efecto de aleatorio del grupo racial anidado dentro de sistema de producción (S<sub>GR</sub>).

$n_1$  y  $n_2$  = Efecto aleatorio del sistema de producción que anida la variación causada por la composición racial.  $\mathcal{E}$  = vector de residuales del modelo.

$\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$  = Efecto aleatorio del error.

## 8.2 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS GENÉTICOS

La heredabilidad ( $h^2$ ) fue estimada de la siguiente manera (Cameron, 1997):

$$h^2 = \frac{\sigma^G}{\sigma^F} = \frac{\sigma^G}{\sigma^G + \sigma^E} \quad (4)$$

Donde:

$\sigma^F$  Es la varianza fenotípica.

$\sigma^E$  Es la varianza aportada por el ambiente

$\sigma^G$  Es la varianza genética aditiva estimada mediante la matriz de relaciones genómicas.

La correlación genética es una medida del grado de enlace genético entre dos o más caracteres en el mismo individuo, se estimó de la siguiente manera (Cameron, 1997; Mrode, 2014):

$$r_A = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (5)$$

Donde:

$r_A$  Es la correlación genética entre dos variables.

$\sigma_{xy}$  Es la covarianza existente entre la variable X y la variable Y.

$\sigma_x$  Es la desviación estándar de la variable X.

$\sigma_y$  Es la desviación estándar de la variable Y.

## 9 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 9.1 EMISIONES DE METANO EN GANADO BOVINO PRODUCTOR DE LECHE.

Las estadísticas descriptivas para las emisiones de CH<sub>4</sub> durante la ordeña fueron 0.687±0.46 mg/min (media ± desviación estándar) y se encuentran en un rango de 0.034 a 4.074 mg/min. La producción de leche diaria fue de 13.1±8.11kg con un rango de 1.25 a 41.61 kg. Finalmente, los valores para la razón entre emisiones de metano al momento de la ordeña y la producción diaria de leche fueron en promedio 0.094±0.12 mg/kg, con un rango entre 0.001 y 1.074 mg/min.

**Cuadro 3** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña en cuatro sistemas de producción de leche en México

Variable	n <sup>a</sup>	Media	DE <sup>b</sup>	Mínimo	Máximo
Emisiones de CH <sub>4</sub> durante la ordeña (mg <sup>c</sup> /min <sup>d</sup> ).	317	0.68	0.465	0.03	4.07
Emisiones de CH <sub>4</sub> por kilogramo de leche (mg/kg <sup>f</sup> ).	317	0.09	0.123	0.00	1.07
Promedio de producción de leche(kg)	317	13.10	8.117	1.25	41.61
Producción total de Leche (kg)	213	151.64	118.923	18.80	624.20

<sup>a</sup>n tamaño de muestra. <sup>b</sup>DE: Desviación Estándar, <sup>c</sup>mg miligramos, <sup>d</sup>min minutos, <sup>f</sup>kg kilogramos.

## 9.2 EMISIONES DE METANO EN GANADO BOVINO PRODUCTOR DE LECHE EN CUATRO SISTEMAS DE PRODUCCIÓN.

### 9.2.1.1 SISTEMA INTENSIVO

En el sistema intensivo las emisiones de CH<sub>4</sub> durante la ordeña fueron 0.0742±0.024 mg/min (media ± desviación estándar) con un rango de 0.034 a 0.140 mg/min (valor mínimo y valor máximo). La producción de leche diaria fue de 24.09±4.8 con rango de 11.06 a 41.6 kg, los valores para la razón entre emisiones de metano al momento de la ordeña y la producción diaria de leche fueron de 0.003±0.001mg/kg con valores de 0.001 hasta 0.008 mg/kg, descritas en el Cuadro 4.

**Cuadro 4** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche en el sistema de producción intensivo de leche en México.

Variable	n <sup>a</sup>	Media	DE <sup>b</sup>	Mínimo	Máximo
Emisiones de CH <sub>4</sub> durante la ordeña (mg <sup>c</sup> /min <sup>d</sup> ).	37	0.070	0.024	0.034	0.140
Emisiones de CH <sub>4</sub> de leche por kilogramo de leche (mg/kg <sup>f</sup> ).	37	0.003	0.001	0.001	0.008
Promedio de producción de leche (kg).	37	24.910	7.494	11.06	41.61
Producción total de leche (kg).	37	366.530	116.478	154.10	624.20

<sup>a</sup>n tamaño de muestra. <sup>b</sup>DE: Desviación Estándar, <sup>c</sup>mg miligramos, <sup>d</sup>min minutos, <sup>f</sup>kg kilogramos.

La producción de leche diaria para el SI fue de 24.91kg por vaca en lactación, la cual es muy similar por lo reportado en estudios anteriores de 26.3kg al día (Núñez *et al.*, 2009) y 25.3 kg al día(SAGARPA 2015).

### 9.2.1.2 SISTEMA LECHERIA FAMILIAR

En el sistema LF las emisiones de CH<sub>4</sub> durante la ordeña fueron 0.842±0.384 mg/min (media ± desviación estándar) con un rango de 0.119 a 1.776 mg/min; la producción de leche diaria fue de 15.94±6.1 con un rango de 4.7 a 35 kg, y los valores para la razón entre emisiones de metano al momento de la ordeña y la producción diaria de leche fueron de 0.06±0.04 mg/kg con valores de 0.006 hasta 0.0213 mg/kg, como se muestra en el Cuadro 5.

**Cuadro 5** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en sistema Lechería Familiar.

Variable	n <sup>a</sup>	Media	DE <sup>b</sup>	Mínimo	Máximo
Emisiones de CH <sub>4</sub> durante la ordeña(mg <sup>c</sup> /min <sup>d</sup> )	104	0.84	0.384	0.119	1.776
Emisiones de CH <sub>4</sub> por promedio de leche (mg/kg <sup>f</sup> ).	104	0.06	0.040	0.006	0.213
Promedio de producción de leche (kg).	104	15.94	6.101	4.7	35

<sup>a</sup>n tamaño de muestra. <sup>b</sup>DE: Desviación Estándar, <sup>c</sup>mg miligramos, <sup>d</sup>min minutos, <sup>f</sup>kg kilogramos..

La producción diaria de leche en este trabajo es superior a lo previamente descrito 8.3kg al día (Vera *et al.*, 2009). Lo cual es atribuible a que el manejo nutricional en la unidad de producción durante el estudio fue el adecuado.

### 9.2.1.3 SISTEMA LECHERIA TROPICAL ESPECIALIZADA

En este sistema las emisiones de CH<sub>4</sub> durante la ordeña fueron 0.84±0.178 mg/min (media ± desviación estándar) con un rango de 0.477 a 1.444 mg/min (valor máximo y valor mínimo), la producción de leche diaria fue de 11.81±6.73 con un rango de 1.85 a 27.7 kg, y los valores para la razón entre emisiones de metano al momento de la ordeña y la producción diaria de leche fueron de 0.003±0.001mg/kg con valores de 0.001 hasta 0.008 mg/kg, como se muestra en el Cuadro 6.

**Cuadro 6** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en sistema de lechería tropical especializada.

Variable	n <sup>a</sup>	Media	DE <sup>b</sup>	Mínimo	Máximo
Emisiones de CH <sub>4</sub> durante la ordeña(mg <sup>c</sup> /min <sup>d</sup> )	76	0.84	0.178	0.477	1.445
Emisiones de CH <sub>4</sub> por promedio de leche (mg/kg <sup>f</sup> ).	76	0.11	0.084	0.029	0.443
Promedio de producción de leche (kg).	76	11.81	6.773	1.85	27.67
Producción total de leche (kg).	76	113.00	40.419	27.8	214.6

<sup>a</sup>n tamaño de muestra. <sup>b</sup>DE: Desviación Estándar, <sup>c</sup>mg miligramos, <sup>d</sup>min minutos, <sup>f</sup>kg kilogramos.

La producción promedio calculada para el LTE fue de 11.81kg por vaca en producción es muy similar a lo reportado en estudios anteriores como 12.3kg al día (SAGARPA 2010); y difiere de los valores reportados en un estudio en la Habana Cuba con animales de la raza Holstein puro, donde se reportó una producción media por día de 15kg por día(García *et al.*, 2001).

#### 9.2.1.4 SISTEMA DOBLE PROPOSITO

En el DP con una N=100 animales estudiados, las emisiones de CH<sub>4</sub> durante la ordeña fueron 0.0742±0.024 mg/min (media ± desviación estándar) y se con un rango de 0.034 a 0.140 mg/min (valor máximo y valor mínimo); la producción promedio de leche fue de 24.09±4.8 con rango de 11.06 a 41.6 kg, y los valores para la razón entre emisiones de metano al momento de la ordeña y la producción diaria de leche fueron de 0.003±0.001mg/kg con valores de 0.001 hasta 0.008 mg/kg , como se muestra en el Cuadro 5.

**Cuadro 7** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en sistema de lechería Doble Propósito.

Variable	n <sup>a</sup>	Media	DE <sup>b</sup>	Mínimo	Máximo
Emisiones de CH <sub>4</sub> durante la ordeña(mg <sup>c</sup> /min <sup>d</sup> )	100	0.65	0.575	0.197	4.074
Emisiones de CH <sub>4</sub> por promedio de leche (mg/kgf).	100	0.15	0.186	0.019	1.074
Promedio de producción de leche (kg).	100	6.77	3.749	1.25	18.15
Producción total de leche (kg).	100	101.51	56.321	18.8	272.3

<sup>a</sup>n tamaño de muestra. <sup>b</sup>DE: Desviación Estándar, <sup>c</sup>mg miligramos, <sup>d</sup>min minutos, <sup>f</sup>kg kilogramos.

### 9.3 ESTIMACIÓN DE VARIANZAS GENÉTICAS Y PARÁMETROS GENÉTICOS.

Se estimaron los componentes de varianza a través de un modelo GBLUP que incluyó como efectos fijos el número de lactaciones y periodo de lactación y como efectos aleatorios la variación ocasionada por el propio individuo.

En el Cuadro 8, se presentan los resultados de los componentes de varianza y la heredabilidad estimados, que resultaron similares a los reportados en la literatura (de Haas *et al.*, 2011; Pickering *et al.*, 2015).

En el 2011 se reportó una heredabilidad con valor de 0.35 para las emisiones de CH<sub>4</sub> en ganado Holstein productor de leche: Ese trabajo fue realizado utilizando valores predichos de CH<sub>4</sub> mediante el uso de ecuaciones de estimación (de Haas *et al.*, 2011) Lo anterior, es un punto a considerar debido a que la información generada a través de esos modelos matemáticos no toma en cuenta factores y procesos fisiológicos propios del animal. Por ejemplo, edad, estado reproductivo, estado de gestación, periodo de lactación, entre otros. Los procesos fisiológicos son factores a considerar ya que influyen en las demandas energéticas del individuo; lo que tiene como repercusión en el consumo, tasa de pasaje, y micro biota ruminal (Romero-Pérez *et al.*, 2011; Pitta *et al.*, 2014; Lima *et al.*, 2015).

Adicionalmente, Lassen y Løvendahl (2016) reportan valores similares a los presentados e Haas (2011) con una heredabilidad de 0.30. Es necesario recalcar que este estudio también se realizó con ecuaciones de estimación.

Paralelamente, Pickering *et al.*, (2015) presentan una heredabilidad estimada de 0.30. Los autores utilizaron como técnica de cuantificación de emisiones de metano un dispositivo de pistola trazadora mediante un láser. Esta técnica les permitió medir 75 animales tres veces al día durante lapsos de cinco minutos en cada **ocasión**, lo que implica una serie de supuestos, tales como el ángulo de medición de CH<sub>4</sub> con respecto al morro del animal, las distancias en la que se

encuentra el operador del sensor, las interrupciones de medición por los movimientos normales de ingesta del animal.

Finalmente, en otras especies de rumiantes también se han realizado trabajos de estimación de componentes de varianza y estimaciones de la heredabilidad. Pinares-Patiño *et al.*, (2013) estimaron una  $h^2$  de 0.29 para emisiones de CH<sub>4</sub> en borregos. Estos autores utilizaron para la cuantificación de metano las cámaras metabólicas; en ellas se midió la producción de gases cuando se ofrecieron dietas controladas, lo cual es muy efectivo para tomar en cuenta la variación generada por el animal. Sin embargo, al ser un ambiente controlado se retira la variación causada por factores ambientales, como son la vegetación, temperatura ambiental, humedad relativa y altitud, entre otros que tienen influencia sobre la producción de gases ruminales y no solo del CH<sub>4</sub> (Romero-Pérez *et al.* 2011).

**Cuadro 8** Valores de varianza genética, residual, fenotípica, y varianza aportada por grupo racial en el sistema (componentes de varianza), para la producción de metano en ganado lechero.

Parámetro	Valor calculado
Varianza S(GR)	0.033 ± 0.017
Varianza genética	0.037 ± 0.018
Varianza residual	0.083 ± 0.034
Varianza fenotípica	0.153
Heredabilidad	0.30 ± 0.21

S(GR) variable de Grupo Racial dentro del sistema de producción.

### 9.3.1 CORRELACIONES GENETICAS

Se utilizó un modelo bivariado para estimar la correlación entre MERM y MILKCH<sub>4</sub>, que resultó positiva (0.87) .La alta correlación genética positiva entre MERM y la MILKCH<sub>4</sub> permite sugerir la factibilidad de proponer programas de mejoramiento genético que disminuya las emisiones de metano en ganado bovino productor de leche sin detrimento de la producción de leche. Con base en la revisión de literatura, este es el primer reporte de una correlación genética entre MILKCH<sub>4</sub> y la producción de CH<sub>4</sub>.

Esta correlación puede servir como un parámetro para la selección y mejoramiento genético, identificando animales que emitan menos CH<sub>4</sub> en un mismo hato.

**Cuadro 9** Correlación genética para las variables emisiones de metano y la tasa de emisiones de metano por kilogramo de leche producida durante la ordeña.

Parámetro	Valor
Correlación genética CH <sub>4</sub> -Tasa de producción de CH <sub>4</sub> por kg de leche	0.874 ± 0.54

CH<sub>4</sub>: metano.

## 10 CONCLUSIONES

Este trabajo representa el primer esfuerzo para cuantificar las emisiones de CH<sub>4</sub> en cuatro sistemas de producción de leche en México. Los resultados aquí presentados sobre la heredabilidad y correlación genética entre las variables de emisiones de metano y la tasa de emisiones de metano por kilogramo de leche producido son información valiosa para sugerir el establecimiento de programas de mejoramiento genético como una estrategia de largo plazo y permanente para la mitigación de emisiones de CH<sub>4</sub> en ganado bovino productor de leche.

De igual manera se cuantificaron por primera vez con una metodología *in vivo* e *in situ* a los animales sin interrumpir o modificar el manejo que reciben dentro de sus unidades de producción en los principales sistemas de producción en México. Esto permitió encontrar evidencia para asegurar que el ambiente no es el único factor que influye sobre la producción de CH<sub>4</sub>, si no que existe variación atribuible al genotipo del animal.

## 11 ANEXO 1.- ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS DE LAS UNIDADES DE PRODUCCIÓN.

### 11.1.1.1 PURISIMA

**Cuadro 9** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a sistema intensivo “La purísima”.

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>DE<sup>b</sup></b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Emisiones de CH <sub>4</sub> durante la ordeña (mg <sup>c</sup> /min <sup>d</sup> ).	37	0.074	0.02	0.034	0.140
Emisiones de CH <sub>4</sub> por promedio de leche (mg/kg <sup>f</sup> ).	37	0.003	0.001	0.001	0.008
Promedio de producción de leche(kg)	37	24.90	7.49	11.06	41.61
Producción total de leche (kg).	37	366.53	116.47	154.1	624.2

<sup>a</sup>n tamaño de muestra. <sup>b</sup>DE: Desviación Estándar, <sup>c</sup>mg miligramos, <sup>d</sup>min minutos, <sup>f</sup>kg kilogramos.

### 11.1.1.2 ESTABLO 5

**Cuadro 10** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Lechería Familiar “La Establo #5”.

Variable	N	Media	DE <sup>b</sup>	Mínimo	Máximo
Emisiones de CH <sub>4</sub> durante la ordeña(mg <sup>c</sup> /min <sup>d</sup> )	16	0.26	0.076	0.119	0.473
Emisiones de CH <sub>4</sub> por promedio de leche (mg/kg <sup>f</sup> ).	16	0.016	0.007	0.006	0.031
Promedio de producción de leche(kg)	16	18.21	7.644	7.45	35

<sup>a</sup>n tamaño de muestra. <sup>b</sup>DE: Desviación Estándar, <sup>c</sup>mg miligramos, <sup>d</sup>min minutos, <sup>f</sup>kg kilogramos.

### 11.1.1.3 ESTABLO 6

**Cuadro 11** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Lechería Familiar “La Establo #6”

Variable	N	Media	DE <sup>b</sup>	Mínimo	Máximo
Emisiones de CH <sub>4</sub> durante la ordeña (mg <sup>c</sup> /kg <sup>d</sup> ).	32	1.25	0.244	0.798	1.776
Emisiones de CH <sub>4</sub> por promedio de leche (mg/kg <sup>f</sup> ).	32	0.1	0.037	0.05	0.213
Promedio de producción de leche (kg).	32	14.23	3.878	6.2	22.2

<sup>a</sup>n tamaño de muestra. <sup>b</sup>DE: Desviación Estándar, <sup>c</sup>mg miligramos, <sup>d</sup>min minutos, <sup>f</sup>kg kilogramos.



#### 11.1.1.4 ESTABLO 7

**Cuadro 12** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Lechería Familiar “La Establo #7”

Variable	N	Media	DE <sup>b</sup>	Mínimo	Máximo
Emisiones de CH <sub>4</sub> durante la ordeña (mg <sup>c</sup> /min <sup>d</sup> ).	25	0.84	0.211	0.466	1.29
Emisiones de CH <sub>4</sub> por promedio de leche (mg/kg <sup>f</sup> ).	25	0.04	0.015	0.023	0.081
Promedio de producción de leche(kg)	25	21.38	4.783	8.8	29.3

<sup>a</sup>n tamaño de muestra. <sup>b</sup>DE: Desviación Estándar, <sup>c</sup>mg miligramos, <sup>d</sup>min minutos, <sup>f</sup>kg kilogramos.

#### 11.1.1.5 ESTABLO 8

**Cuadro 13** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Lechería Familiar “La Establo #8”

Variable	N	Media	DE <sup>b</sup>	Mínimo	Máximo
Emisiones de CH <sub>4</sub> durante la ordeña (mg <sup>c</sup> /min <sup>d</sup> ).	31	0.71	0.163	0.459	1.074
Emisiones de CH <sub>4</sub> por promedio de leche (mg/kg <sup>f</sup> ).	31	0.06	0.034	0.028	0.187
Promedio de producción de leche (kg).	31	12.13	4.386	4.7	24.8

<sup>a</sup>n tamaño de muestra, <sup>b</sup>DE: Desviación Estándar, <sup>c</sup>mg miligramos, <sup>d</sup>min minutos, <sup>f</sup>kg kilogramos.



### 11.1.1.6 AGUACATAL

**Cuadro 14** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Lechería Tropical Especializada “Aguacatal”

Variable	N	Media	DE <sup>b</sup>	Mínimo	Máximo
Emisiones de CH <sub>4</sub> durante la ordeña (mg <sup>c</sup> /min <sup>d</sup> ).	38	0.83	0.171	0.5206791	1.342
Emisiones de CH <sub>4</sub> por promedio de leche (mg/kg <sup>f</sup> ).	38	0.05	0.019	0.029	0.11
Promedio de producción de leche (kg).	38	17.53	4.659	9.83	27.67
Producción total de leche (kg).	38	135.77	36.071	76.4	214.6

<sup>a</sup>n tamaño de muestra, <sup>b</sup>DE: Desviación Estándar, <sup>c</sup>mg miligramos, <sup>d</sup>min minutos, <sup>f</sup>kg kilogramos.

### 11.1.1.7 SANTA ELENA

**Cuadro 15** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Lechería Tropical Especializada “Santa Elena”

Variable	N	Media	DE <sup>b</sup>	Mínimo	Máximo
Emisiones de CH <sub>4</sub> durante la ordeña (mg <sup>c</sup> /min <sup>d</sup> ).	38	0.84	0.186	0.477	1.445
Emisiones de CH <sub>4</sub> por promedio de leche (mg/kg <sup>f</sup> ).	38	0.16	0.088	0.051	0.443
Promedio de producción de leche (kg).	38	6.09	2.009	1.85	9.31
Producción total de leche (kg).	38	90.23	30.738	27.8	139.6

<sup>a</sup>n tamaño de muestra, <sup>b</sup>DE: Desviación Estándar, <sup>c</sup>mg miligramos, <sup>d</sup>min minutos, <sup>f</sup>kg kilogramos.



### 11.1.1.8 LA DOÑA

**Cuadro 16** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Doble Propósito “La Doña”

Variable	N	Media	DE <sup>b</sup>	Mínimo	Máximo
Emisiones de CH <sub>4</sub> durante la ordeña (mg <sup>c</sup> /min <sup>d</sup> ).	51	0.77	0.775	0.235	4.074
Emisiones de CH <sub>4</sub> por promedio de leche (mg/kg <sup>f</sup> ).	51	0.23	0.232	0.047	1.074
Promedio de producción de leche (kg).	51	4.19	2.009	1.25	8.16
Producción total de leche (kg).	51	62.75	30.277	18.8	122.4

<sup>a</sup>n tamaño de muestra, <sup>b</sup>DE: Desviación Estándar, <sup>c</sup>mg miligramos, <sup>d</sup>min minutos, <sup>f</sup>kg kilogramos.

### 11.1.1.9 LA POSTA

**Cuadro 17** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Doble Propósito “La Posta”

Variable	N	Media	DE <sup>b</sup>	Mínimo	Máximo
Emisiones de CH <sub>4</sub> durante la ordeña (mg <sup>c</sup> /min <sup>d</sup> ).	33	0.51	0.142	0.267	0.826
Emisiones de CH <sub>4</sub> por promedio de leche (mg/kg <sup>f</sup> ).	33	0.05	0.020	0.019	0.105
Promedio de producción de leche (kg).	33	10.87	2.829	5.04	18.15
Producción total de leche (kg).	33	163.07	42.431	75.6	272.3

<sup>a</sup>n tamaño de muestra, <sup>b</sup>DE: Desviación Estándar, <sup>c</sup>mg miligramos, <sup>d</sup>min minutos, <sup>f</sup>kg kilogramos.



**11.1.1.10 EL ZAPATO**

**Cuadro 18** Estadísticas descriptivas para las variables de emisiones de metano durante la ordeña; Emisiones de metano por producción de leche, en la unidades de producción perteneciente a Doble Propósito “La Posta”

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>DE<sup>b</sup></b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Emisiones de CH <sub>4</sub> durante la ordeña (mg <sup>c</sup> /min <sup>d</sup> ).	16	0.53	0.171	0.197	0.905
Emisiones de CH <sub>4</sub> por promedio de leche (mg/kg <sup>f</sup> ).	16	0.09	0.041	0.022	0.169
Promedio de producción de leche (kg).	16	6.54	1.605	2.89	9.71
Producción total de leche (kg).	16	98.12	24.092	43.34	145.72

<sup>a</sup>n tamaño de muestra, <sup>b</sup>DE: Desviación Estándar, <sup>c</sup>mg miligramos, <sup>d</sup>min minutos, <sup>f</sup>kg kilogramos.

## 12 BIBLIOGRAFÍA

- Anon, 1977. Design and development of a long-term rumen simulation technique ( Rusitec ).
- Beauchemin, K. a., McGinn, S.M. y Petit, H. V., 2007. Methane abatement strategies for cattle: Lipid supplementation of diets. *Canadian Journal of Animal Science*, 87(3), pp.431–440. Available at: <http://pubs.aic.ca/doi/abs/10.4141/CJAS07011>.
- Becker, W.A., 1984. *Manual of quantitative genetics*, Academic Enterprises. Available at: <https://books.google.com/books?id=5n7wAAAAMAAJ>.
- Bhatta, R., Enishi, O. y Kurihara, M., 2007. Measurement of Methane Production from Ruminants \*. , 20(8), pp.1305–1318.
- Boadi, D. *et al.*, 2004. Mitigation strategies to reduce enteric methane emissions from dairy cows: Update review. *Canadian Journal of Animal Science*, 84(3), pp.319–335. Available at: <http://pubs.aic.ca/doi/abs/10.4141/A03-109>.
- Bonilla, C. y Lemus, C., 2012. Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático . Revisión Enteric methane emission by ruminants and its contribution to global climate change . Review.
- Brouček, J., 2014. METHODS OF METHANE MEASUREMENT IN RUMINANTS. *Research Institute for Animal Production Nitra, Slovak Republic.*, 47(1337–9984), pp.51–60.
- Calderon, R.C. *et al.*, 2007. *Manual ilustrado para el manejo de la Lechería Tropical Especializada con Bovinos.*,
- Cameron, N.D., 1997. *Selection indices and prediction of genetic merit in animal breeding.*, CAB international.
- Carmona, J.C. *et al.*, 2005. El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. , 18, pp.49–63.
- Castelán-ortega, O.A. y Ku-vera, J.C., 2014. Modeling methane emissions and methane inventories for cattle production systems in Mexico. , 27(2), pp.185–191.
- Chagunda, M.G.G. *et al.*, 2013. Measurement of enteric methane from ruminants using a hand-held laser methane detector. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A–Animal Science*, 63(2), pp.68–75.
- Chandramoni, C.. *et al.*, 2002. Energy balance in faunated and defaunated sheep on a ration high in concentrate to roughage (good quality) ratio. *Pakistan Journal of Nutrition*, 10, pp.31–33.
- CONABIO, 2011. *La Biodiversidad en Puebla*,
- Crump, S.L., 1946. The estimation of variance components in analysis of variance. *Biometrics Bulletin*, 2(1), pp.7–11.

- Crump, S.L., 1951. The present status of variance component analysis. *Biometrics*, 7(1), pp.1–16.
- Eisenhart, C., 1947. The assumptions underlying the analysis of variance. *Biometrics*, 3(1), pp.1–21.
- Falconer, D.S., 1989. *Introduction to quantitative genetics*, Longman, Scientific y Technical. Available at: [https://books.google.com/books?id=on\\_wAAAAMAAJ](https://books.google.com/books?id=on_wAAAAMAAJ).
- FAO, 2010. Greenhouse Gas Emissions from the Dairy Sector. *www.FAO.com*, p.98. Available at: <http://www.fao.org/docrep/012/k7930e/k7930e00.pdf>.
- Fernando, R.L., Cheng, H. y Garrick, D.J., 2016. An efficient exact method to obtain GBLUP and single-step GBLUP when the genomic relationship matrix is singular. *Genetics Selection Evolution*, 48(1), p.80.
- Fernando, S.C. *et al.*, 2010. Rumen microbial population dynamics during adaptation to a high-grain diet. *Applied and Environmental Microbiology*, 76(22), pp.7482–7490.
- García, L.R., González, R. y Ponce, P., 2001. Evaluación de un sistema de producción de leche con vacas Holstein en el trópico Revista Cubana de Ciencia Agrícola, vol. 35, núm. 2, 2001, pp. 121-127 Instituto de Ciencia Animal La Habana, Cuba. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 35(2), pp.121–127.
- Garnsworthy, P.C. *et al.*, 2012a. On-farm methane measurements during milking correlate with total methane production by individual dairy cows. *Journal of dairy science*, 95(6), pp.3166–80. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22612952> [Accessed July 22, 2014].
- Garnsworthy, P.C. *et al.*, 2012b. Variation among individual dairy cows in methane measurements made on farm during milking. *Journal of dairy science*, 95(6), pp.3181–9. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22612953> [Accessed July 22, 2014].
- Gerber, P.J. *et al.*, 2013. *Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería - Una evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación*. @FAO, ed., Roma: Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO), Roma.
- Gill, M., Smith, P. y Wilkinson, J.M., 2010. Mitigating climate change: the role of domestic livestock. *Animal*, 4(3), p.323.
- Gilmour, R. *et al.*, 2009. *ASReml User Guide*,
- Godfray, H.C.J. *et al.*, 2011. The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327, pp.812–818.
- Gómez, S., Angeles, M. y Bonilla, J.A., 2012. *Tecnologías para reducir las emisiones de metano en rumiantes*,
- Gonzales, P., Guerra, D. y Pena, F., 2007. RESEÑA SOBRE LOS MODELOS DEL DÍA DE CONTROL EN LAS EVALUACIONES GENÉTICAS DEL GANADO DE LECHE Dianelys González-Peña y D. Guerra. *Ciencia y Tecnología Ganadera*, 1(3), pp.93–109.

- Guo, Y.Q. *et al.*, 2008. Effect of tea saponin on methanogenesis, microbial community structure and expression of *mcrA* gene, in cultures of rumen micro-organisms. *Letters in applied microbiology*, 47(5), pp.421–6. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19146532> [Accessed July 23, 2014].
- Haas, Y. De *et al.*, 2011. Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. *Journal of dairy science*, 94(12), pp.6122–34. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22118100> [Accessed July 22, 2014].
- Hayes, B. *et al.*, 2009. Invited review: Genomic selection in dairy cattle: Progress and challenges. *Journal of dairy science*, 92, pp.433–443.
- Henderson, C.R., 1953. Estimation of variance and covariance components. *Biometrics*, 9(2), pp.226–252.
- Hook, S.E., Wright, G. y McBride, B.W., 2010. Methanogens: Methane Producers of the Rumen and Mitigation Strategies. , 2010, pp.50–60.
- Hoover, W.H., Crooker, B.A. y Sniffen, C.J., 1976. Effects of differential solid-liquid removal rates on protozoa numbers in continous cultures of rumen contents. *Journal of Animal Science*, 43(2), pp.528–534.
- INDETEC, 2010. *Sector Agropecuario Nacional Diagnostico y Propuestas Estructurales. México.*,
- INEGI, 2014. *Anuario estadístico y geográfico de Veracruz de Ignacio de la Llave*, Available at: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/productos/default.aspx?c=265ys=inegiyupc=702825201982ypr=Prodyef=yf=2ycl=0ytg=13ypr=0yct=106030000>
- INEGI, 2013. *INEGI PUBLICACIONES COMPLEMENTARIAS, ANUAL ESTADISTICO.*,
- INEGI, 2009. *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*, Available at: <http://www.inegi.org.mx/>.
- INEGI, 2015. *Referencias geográficas y extensión territorial de México*, Available at: <http://intranet.capacitacion.inegi.gob.mx>.
- INEGI, 2016. *Uso de Suelos en Territorio de la Republica de los Estados Unidos Mexicanos.* , p.[www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclat/usossuelo/](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclat/usossuelo/).
- IPCC, 2014. *Cambio climático 2014.*
- IPCC, 2007. *Estabilización de los gases atmosféricos de efecto invernadero: implicaciones físicas, biológicas y socioeconómicas.*,
- Johnson, K. a y Johnson, D.E., 1995a. Methane emissions from cattle. *Journal of animal science*, 73(8), pp.2483–92. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8567486>.
- Johnson, K. a y Johnson, D.E., 1995b. Methane emissions from cattle Methane Emissions from Cattle. , pp.2483–2492.
- Ku-Vera, J.C. *et al.*, 2014. Manipulation of the energy metabolism of ruminants in the

- tropics: options for improving meat and milk production and quality. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 48(1), pp.43–53.
- Kurihara, M. *et al.*, 1999. Methane production and energy partition of cattle in the tropics. *The British journal of nutrition*, 81(3), pp.227–34. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10434849>.
- Lima, F.S. *et al.*, 2015. Prepartum and postpartum rumen fluid microbiomes: characterization and correlation with production traits in dairy cows. *Applied and environmental microbiology*, 81(4), pp.1327–1337.
- Lynch, M. y Walsh, B., 1998. *Genetics and analysis of quantitative traits*, Sinauer Sunderland, MA.
- Moss, a. R., Jouany, J.P. y Newbold, J., 2000. Review article Methane production by ruminants : its contribution to global warming. *Annales de Zootechnie*, 49, pp.231–253.
- Mrode, R.A., 2014. *Linear models for the prediction of animal breeding values*, Cabi.
- Núñez, H.G. *et al.*, 2009. *Producción de leche de bovino en el sistema intensivo. Libro técnico N.23*, Veracruz, México.
- Ober, U. *et al.*, 2011. Predicting genetic values: A kernel-based best linear unbiased prediction with genomic data. *Genetics*, 188(3), pp.695–708.
- OCDE-FAO, 2015. *Perspectivas Agrícolas 2015*, OECD Publishing, París.
- Pinos, R.J. y Gonzales, M.S., 2008. EFECTOS BIOLÓGICOS Y PRODUCTIVOS DE LOS IONÓFOROS EN RUMIANTES. *Sitio Argentino de ciencias en producción animal*, 25, pp.379–385.
- Pitta, D.W. *et al.*, 2014. Temporal dynamics in the ruminal microbiome of dairy cows during the transition period. *Journal of animal science*, 92(9), pp.4014–4022.
- Purcell, S. layout, 2010. *PLINK (1.07) Documentation*,
- Ríos, Á. *et al.*, 2010. Estimación de parámetros genéticos para características de fertilidad en ganado Suizo Pardo bajo condiciones subtropicales en México. *Veterinaria México OA*, 41(2), pp.117–129. Available at: <http://revistas.unam.mx/index.php/Veterinaria-Mexico>.
- Román-Ponce, S.I., Ruiz-lópez, F.D.J. y Hugo, H., 2013. Efectos de cruzamiento para producción de leche y características de crecimiento en bovinos de doble propósito en el trópico húmedo.
- Romero-Pérez, G.A. *et al.*, 2011. Effect of environmental factors and influence of rumen and hindgut biogeography on bacterial communities in steers. *Applied and environmental microbiology*, 77(1), pp.258–268.
- SAGARPA, 2015. *Escenario Base, Proyecciones para el Sector Agropecuario de México 2009-20018*, Available at: <https://www.fapri.missouri.edu/outreach/publications/2009/OutlookPub2009.pdf>.
- SAGARPA, 2010. Situación actual y perspectiva de la producción de leche de bovino en

- México 2010. *Claridades Agropecuarias*, 1(207), pp.34–43.
- Sagarpa y Inegi, 2009. *Prontuario de Información Geográfica Municipal*.
- Sharma, R.K., 2005. Nutritional strategies for reducing methane production by ruminants. *Indian J Res*, 4(1).
- SHCP, 2014. *Financiera Rural. Monografía de Carne de Bovino; 2012.* , pp.1–11.
- SIAP, 2016. *Reporte de Producción Anual en el Sector Agropecuario México*.
- Sosa, A., Galindo, J. y Bocourt, R., 2007. Metanogénesis ruminal: aspectos generales y manipulación para su control. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 41, pp.105–114.
- Steinfeld, H. *et al.*, 2009. *La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones*,
- Storm, M. *et al.*, 2012. Methods for Measuring and Estimating Methane Emission from Ruminants. *animals*, (2076–2615), pp.160–183. Available at: [www.mdpi.com/journal/animals](http://www.mdpi.com/journal/animals).
- Trenberth, K.E., Fasullo, J.T. y Kiehl, J., 2009. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3), pp.311–323.
- UNFPA, 2015. *Report of the global thematic consultation on population dynamics.*,
- Vera, A.H. *et al.*, 2009. *Producción de Leche de Bovino en el Sistema Familiar. INIFAP CIRGOC. Libro Técnico Núm. 24.*, Veracruz, México.
- Volkshuisvesting, M. Van y Ordening, R., 2003. A comparison of measurement methods to determine landfill methane emissions. , (June).
- Waghorn, G.C. *et al.*, 2000. Methanogenesis from forages fed to sheep. , pp.167–171.
- Zambrano A, J. *et al.*, 2015. Estimation and comparison of conventional and genomic breeding values in Holstein cattle of Antioquia, Colombia. *Revista MVZ Córdoba*, 20(3), pp.4739–4753. Available at: <http://revistas.unicordoba.edu.co/ojs/index.php/mvz/article/view/963/html>.