

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS PARA MEDIR O ESTIMAR LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Measuring or estimating greenhouse gas emissions techniques

Jaurena, G.¹, Juliarena, P.², Errecart, P.M.³, Arroquy, J.I.⁴, Berone, G.³, Posse, G.⁵ y Ricci, P.³

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía - Cátedra de Nutrición Animal

Univ. del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Tandil

INTA EEA Balcarce, provincia de Buenos Aires

INTA EEA Cesáreo Naredo, Casbas, provincia de Buenos Aires

INTA Castelar, Hurlingham, Buenos Aires

Contenido

Resumen	61
Summary	62
Introducción	62
Metano entérico	62
Hexafluoruro de azufre (SF ₆)	63
Cámaras de respiración	65
Técnicas <i>in-vitro</i>	65
Modelos matemáticos	67
Gases de efecto invernadero provenientes del estiércol	67
Cálculos de inventario según el IPCC	68
Metano entérico	69
Gases provenientes del estiércol	70
Determinación de factores de emisión con torres micrometeorológicas	71
Conclusiones	72
Bibliografía	72

RESUMEN

La disponibilidad de técnicas objetivas para medir o predecir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es fundamental para el desarrollo de trabajos de investigación y de gestión de las emisiones de GEI en los sistemas agropecuarios. Existe una variada disponibilidad de técnicas e instrumentos que permiten abordar estudios a nivel ruminal, tales como las técnicas *in vitro*, o a escala de animal o incluso de rodeo (e.g. cámaras de respiración, torres micrometeorológicas). En este capítulo se describen diferentes técnicas utilizadas para obtener indicadores de las emisiones de GEI, y se explica brevemente la estrategia de cálculo de los inventarios nacionales.

Palabras clave. cambio climático, metodologías, técnicas, cálculos.

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía - Cátedra de Nutrición Animal. Av. San Martín 4453 (C1417 DSE – Ciudad Autónoma de Buenos Aires)

²Univ. del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Paraje Arroyo Seco S/N (Tandil, Prov. de Buenos Aires)

³INTA EEA Balcarce, Ruta Nacional 226 km 73,5 (7620 – Balcarce, Prov. de Buenos Aires)

⁴INTA EEA Cesáreo Naredo, Ruta Nac. Nº 33 km. 221; CC 44 (B6435 – Casbas, Prov. de Buenos Aires)

⁵INTA Castelar, Nicolas Repetto y de los Reseros s/n, (1686 - Hurlingham, Buenos Aires).

SUMMARY

The availability of appropriate techniques to measure or predict greenhouse gas (GHG) emissions is essential for the development of research and management in agricultural systems. There is an ample availability of techniques and instruments to study at ruminal level, such as *in vitro* techniques, or at animal or even rodeo scale GHG emissions (e.g. breathing chambers, micrometeorological towers). This chapter describes different techniques used to obtain the GHG emission indicators, and the strategy to compute national inventories is briefly explained.

Key words. climate change, methodologies, techniques, computations.

INTRODUCCIÓN

La medición objetiva de las emisiones de gases de efecto invernadero (**GEI**) es importante para desarrollar estudios de simulación, cálculos de Huella de Carbono, o inventarios nacionales de GEI, además son imprescindibles para evaluar medidas de mitigación o resultados derivados de investigaciones sobre alimentación, mejoramiento genético, estados fisiológicos, e interacciones de los tratamientos sobre la emisión de otros GEIs. Es un requisito crítico para conocer las contribuciones de las diversas actividades humanas, y gestionar las estrategias de mitigación.

La simplificación obligada de procesos bióticos y abióticos complejos involucrados en las emisiones de GEI, conduce al estudio parcializado de las emisiones y retenciones de los GEI para cada actividad. Esta fragmentación es necesaria para comprender los mecanismos involucrados, pero puede inducir a ignorar compensaciones o efectos sinérgicos (Gerber *et al.*, 2013) que sólo son visualizados por un análisis completo del sistema. Esta característica dual (necesidad de enfoques reduccionistas y sistémicos) impone la necesidad del trabajo interdisciplinario y la complementariedad entre distintas técnicas y enfoques.

Las metodologías más apropiadas para cada caso varían ampliamente dependiendo del objetivo de estudio y la escala de análisis requerido (rumen, animal, rodeo, población; Capítulo 4). La comparación de las contribuciones de GEI entre actividades, regiones, países y el análisis de la evolución temporal o impacto de diferentes propuestas de mitigación exige sistemas de cálculo "objetivos" y normalizados tales como la estrategia propuesta por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC - "Intergovernmental Panel on Climate Change" dependiente de la ONU) que es el organismo de referencia para la confección de los inventarios nacionales (Ver "Cálculos de inventario según el IPCC"). En el otro extremo, la evaluación del potencial de mitigación de alimentos o aditivos se puede realizar a través de estudios de fermentación ruminal *in vitro* que permiten comparar en forma simultánea un gran número de tratamientos y repeticiones (lo que resulta impracticable para estudios *in vivo* con animales). A su vez, estos resultados deben ser validados a nivel productivo, incluyendo mediciones directas sobre los animales de emisiones, consumo, ambiente ruminal y ciclo de nutrientes.

En nuestro país, se han utilizado técnicas *in vitro* desde *c.a.* 1990 y desde el año 2005 se han estado realizando estudios con la técnica del SF₆ (Bárbaro *et al.*, 2008). Desde hace un par de años el INTA puso en funcionamiento cuatro cámaras de respiración (**CR**) de circuito abierto con el objetivo de obtener factores de emisión de metano entérico locales, con los alimentos, razas y categorías animales más utilizadas en Argentina. También se han desarrollado modelos matemáticos predictivos para diferentes condiciones productivas.

El objetivo de este capítulo es presentar las diferentes técnicas disponibles para obtener los indicadores de las emisiones de GEI según su procedencia (*e.g.* entéricos, fecales o efluentes), junto con la estrategia de cálculo de los inventarios nacionales.

METANO ENTÉRICO

Las emisiones entéricas de metano por parte de los rumiantes son aproximadamente diez veces superiores a las derivadas de los efluentes (Makkar y Vercoe, 2007). El rumen juega un rol central en la emisión de metano por lo que es crucial contar con medidas objetivas de las emisiones entéricas para poder establecer líneas de base y evaluar el impacto de diferentes estrategias de mitigación conducentes a reducir su producción.

Actualmente existen varias técnicas (e.g. *in vivo*, *in vitro*) que se adecuan a diferentes propósitos y condiciones experimentales. Las técnicas *in vivo*, si bien exponen el resultado directamente medido sobre los animales, exigen el mantenimiento de animales y la disponibilidad de infraestructura y equipamiento de alto costo. Por el contrario, las técnicas *in vitro* constituyen modelos simples que tratan de imitar las condiciones del rumen y resultan significativamente más económicas, por lo que son la técnica de preferencia para evaluar el impacto de diferentes alimentos o aditivos que afectan la microbiota, el ambiente ruminal, o la disponibilidad de sustratos.

La producción de metano entérico puede medirse o estimarse/predecirse según la necesidad o propósito del estudio, ésta primera distinción diferencia las mediciones empíricas que cuantifican las emisiones propiamente dichas (e.g. cámaras de calorimetría) de los modelos predictivos que se emplean para el cálculo de inventarios, análisis de ciclo de vida y que se basan en predicciones matemáticas basadas en indicadores indirectos (e.g. IPCC).

Las primeras determinaciones de la producción de CH₄ de origen entérico se remontan a estudios de calorimetría indirecta a partir del año 1903 (Hammond *et al.*, 2016) con el propósito de cuantificar las pérdidas de la energía consumida (Washburn y Brody, 1937). Los métodos para medir las emisiones de CH₄ se pueden diferenciar en directos (Patra, 2016) que miden directamente sobre el animal, o indirectos que se basan en estimaciones derivadas de características de la fermentación ruminal como las técnicas *in vitro* (Pinares-Patiño y Clark, 2008; Patra, 2016), modelos estadísticos, o estimaciones a partir de la composición de la leche, de los microorganismos presentes en las heces (Patra, 2016), la cantidad y tipo de ácidos grasos volátiles producto de la fermentación y parámetros de plasma sanguíneo (Jonker *et al.*, 2019).

Entre los métodos directos pueden diferenciarse de acuerdo con el tiempo que demandan las mediciones, en métodos de larga duración (1 a 7 días; Hammond *et al.*, 2016), ya sea sobre animales individuales o sobre grupos de animales (Patra, 2016) y de corta duración, tales como los empleados para medir en condiciones similares a las de producción o trabajando con gran número de animales, que se usan para estimar parámetros genéticos (Goopy *et al.*, 2016).

Las determinaciones de metano realizadas en cámaras de respiración (medición directa de largo tiempo) han sido utilizadas en evaluaciones de metabolismo energético para cuantificar las pérdidas de energía consumida como gases, evaluar alimentos, aditivos, y debido a la precisión y exactitud que ofrecen sus mediciones, son consideradas la técnica de referencia o “*gold standard*” para validar otros métodos de medición o de estimación indirecta; además permiten controlar el ambiente en el cual se encuentra el animal (Storm *et al.*, 2012). El principio de funcionamiento de las cámaras consiste en coleccionar todo el aire exhalado y eructado y medir la concentración de metano junto con el flujo de aire del sistema. Existen variantes de este método, como las *cámaras de cabeza* (*head box systems*), en donde en lugar de introducir todo el animal dentro de una cámara, se coloca una cámara en la parte delantera del animal (Place *et al.*, 2011).

La limitación de los métodos antes descriptos es que los animales no pueden estar en las condiciones normales de producción. La técnica del gas trazador hexafluoruro de azufre (SF₆) es un método directo, individual y de larga duración ampliamente utilizado y que permite trabajar con los animales en pastoreo (Zimmerman, 1993; Johnson *et al.*, 1994). Existen otros métodos que permiten trabajar en condiciones de producción y por tanto sin control de las condiciones ambientales. Entre estos métodos, se encuentran las cámaras de acumulación portátiles que permiten alojar al animal en una cámara de tamaño reducido por un corto período de tiempo (Hegarty, 2013), los detectores laser (Chagunda *et al.*, 2013; Ricci *et al.*, 2014), y los muestreadores de aire exhalado en comederos o alimentadores (Garnsworthy *et al.*, 2012; Troy *et al.*, 2013; Zimmerman y Zimmerman, 2012). Dentro del último grupo, se encuentra el sistema “Green Feed” (C-Lock Inc., Rapid City, South Dakota, USA) utilizado en los últimos años para generar información de emisiones de metano de animales individuales en condiciones de producción tanto en confinamiento como en pastoreo (Hammond *et al.*, 2016). Dentro de los métodos de medición grupal se encuentran el Politunel (Lockyer y Jarvis, 1995), y el láser de camino abierto (en inglés *open path lasers*; Laubach y Kelliher, 2005).

Hexafluoruro de azufre (SF₆)

Las emisiones de CH₄ de origen entérico pueden estimarse empleando la técnica desarrollada por Johnson *et al.* (1994) empleando SF₆ como gas marcador. La técnica consiste en suministrar a los animales bolos intraruminales que contienen SF₆ que se libera en forma lenta y a una tasa conocida, durante la etapa de

medición se colectan muestras del aire exhalado y eructado por los animales, las que posteriormente se analizan por cromatografía gaseosa para conocer la concentración de SF₆ y CH₄.

El bolo intraruminal está construido con un vástago de bronce hueco de fondo cerrado y abierto en su parte superior donde se coloca el SF₆ y que se cierra con una tuerca de ajuste roscada que tiene un orificio por donde libera el gas. Los bolos, una vez confeccionados, deben ser calibrados durante 30 a 90 días con el objetivo de determinar su duración y la tasa de liberación del SF₆ (se sugiere entre 1 y 4 mg SF₆ día⁻¹ para ovinos y bovinos, respectivamente; Deighton *et al.*, 2014; Pinares-Patiño *et al.*, 2011). El bolo conteniendo el SF₆ es colocado en el rumen del animal por única vez mediante una sonda esofágica como mínimo 15 días previos al primer muestreo.

El aire eliminado, producto de la respiración normal y de las eructaciones, es muestreado, por succión, mediante una línea de muestreo colocada cerca de los ollares, y en su otro extremo conectada a un tubo colector hermético ("canister") que se encuentra al vacío (presión negativa). Los tubos colectores varían en tamaño (entre 0,5 a 2,5 litros de capacidad), material (*e.g.* PVC, acero inoxidable), y forma (*e.g.* U invertida, cilíndrica; Berndt *et al.*, 2014). Las líneas de muestreo tienen una espiga de acople rápido, una manguera (polietileno, PFA) y un restrictor de flujo de aire que limita la cantidad de aire que toma el tubo colector por unidad de tiempo. Los restrictores varían en modelo, material y tasa de flujo de aire que restringen, por lo que de ellos dependerá el tamaño del tubo al cual pueden conectarse y la duración del período de colección de muestra (Berndt *et al.*, 2014).

El muestreo consiste en colocar sobre los animales los tubos colectores y línea/s de muestreo por un período que puede variar entre 24 h (el más frecuente; y reemplazando los tubos diariamente hasta completar un mínimo de 5 muestras por animal) y 120 h con el mismo juego de tubos, pero con mayor restricción de flujo de aire tomado en la muestra (modificación ideada en Argentina por Gere y Gratton, 2010). Esta última alternativa, tiene amplias ventajas dado que permite tomar muestras en sistemas de producción reales, con menor manipulación de los animales, reduciendo las alteraciones del comportamiento y consumo de alimento. En forma simultánea a la toma de muestras del aire exhalado por los animales, se recolectan muestras del ambiente en el que se encuentran los animales para corregir el cálculo de las emisiones de los animales.

Una vez recolectadas las muestras de aire se determina, sobre una alícuota y por cromatografía gaseosa, las concentraciones de SF₆ y CH₄. Dado que la tasa de liberación diaria de SF₆ es previamente conocida, la cantidad de CH₄ producido es estimada a partir de la siguiente fórmula (Lassey *et al.*, 2011).

$$\text{CH}_4 \text{ (g/día)} = \text{TLSF}_6 \times \frac{(\text{CH}_4 \text{ M} - \text{CH}_4 \text{ A})}{(\text{SF}_6 \text{ M} - \text{SF}_6 \text{ A})} \times \frac{\text{PM CH}_4}{\text{PM SF}_6} \times 1000$$

Donde:

TLF₆: tasa de liberación de SF₆ (mg/día)

CH₄ M: concentración CH₄ (ppm, μmol mol⁻¹) en la muestra del animal

CH₄ A: concentración CH₄ (ppm, μmol mol⁻¹) en la muestra del ambiente

SF₆ M: concentración de SF₆ (ppt, pmol mol⁻¹) en la muestra del animal

SF₆ A: concentración de SF₆ (ppt, pmol mol⁻¹) en la muestra del ambiente

PM CH₄: peso molecular del metano, *i.e.* 16

PM SF₆: peso molecular del SF₆, *i.e.* 146.

Dado que el equipo está montado sobre los animales hay probabilidad de que los tubos se pierdan, por lo que se suelen montar dos por animal, para asegurar que siempre se tendrá una muestra por animal. Además, es importante considerar que los animales deben acostumbrarse al equipo de muestreo y manejo durante la experimentación (*ca.* 30 días).

Algunos de los trabajos realizados en nuestro país aplicando esta técnica han aportado información para el conocimiento de los niveles base de producción de metano entérico (Bárbaro *et al.*, 2008), y se han evaluado manejos dietarios tanto en animales de recría en pasturas templadas (Loto *et al.*, 2019; Ricci *et al.*, 2018a,b), tropicales (Arroquy *et al.*, 2016; Hernández *et al.*, 2016), como en animales en engorde a corral (Loto *et al.*, 2019), vacas de cría adultas (Gere *et al.*, 2019) y la relación entre emisiones de metano y microbiota ruminal (Ricci *et al.*, 2017).

Cámaras de respiración

Las cámaras de ambiente controlado o de respiración se utilizan para medir la cantidad total de gases producidos por animales y se usaron originalmente en estudios de calorimetría para contabilizar los requerimientos de energía de los animales, en donde se realizaban estudios de producción de calor complementarios a la medición de gases. En la actualidad, las cámaras se utilizan para el estudio de la producción de metano, dióxido de carbono, consumo de oxígeno, y en algunos casos producción de hidrógeno. Las cámaras permiten conocer la cantidad de gases producidos por el animal en un determinado período de tiempo mediante la diferencia en la concentración de gases de entrada y salida de la cámara junto con el flujo de aire que circula por la cámara.

El INTA ha adquirido cuatro cámaras de ambiente controlado para la determinación de GEI, dos instaladas en la EEA Balcarce (Provincia de Buenos Aires) y dos en el Instituto de Ciencia Animal de Chaco Semi Árido (Leales, Provincia de Tucumán). Cada una de las cámaras (Figura 3.1) tienen *ca.* 23 m³ (*ca.* 2,70 × 3,70 m × 2,30 m, respectivamente alto, largo y ancho), y están construidas con paneles de poliuretano recubiertos en acero inoxidable, y cuentan con laterales vidriados (2 × 1,5 m, largo y ancho respectivamente). El interior de las cámaras tiene un brete que permite acceso al alimento (con registro automático del consumo en tiempo real) y al agua, piso con cubierta de goma para mejor confort del animal y una rejilla para el escurrimiento de agua de lavado. Las cámaras cuentan con acceso y protección para el personal.

Las cámaras permiten regular las condiciones de temperatura y humedad y son controladas desde una computadora donde se maneja y supervisa todo el sistema, así como se recolecta y almacenan los datos de concentración de gases, parámetros de ambiente y consumo de agua y alimento. El sistema además cuenta con cámaras que permiten tomar y almacenar imágenes.

Las muestras de gas son tomadas cada 6 min en el ducto de salida de aire de las cámaras, registrándose en ese mismo punto la temperatura, humedad relativa y flujo de aire, y determinándose las concentraciones de O₂ (Tecnología paramagnética, rangos 0-100%), CO₂ (Tecnología Infrarroja, celda IR 1520, rangos 0-5000 ppm) y CH₄ (Tecnología Infrarroja, celda GFX, rangos 0-100/1000 ppm). La producción diaria de CH₄ y CO₂ se calcula teniendo en cuenta los parámetros medidos de ambiente (temperatura, humedad, presión), flujo de aire y concentración de gases, según la metodología de cálculo descripta por Pinares y Waghorn (2012).

Técnicas *in-vitro*

La técnica de producción de gas *in vitro* ha sido empleada para evaluar la fermentación ruminal de alimentos por muchos años. Con el creciente interés en explicar la emisión de metano entérico y dado que la calidad de los alimentos está entre sus principales determinantes, las técnicas *in vitro* fueron adaptadas y constituyen la técnica de preferencia para las etapas iniciales de investigaciones sobre el potencial de producción de metano de alimentos y aditivos.

Las técnicas en sus diferentes variantes consisten básicamente en simular las condiciones del rumen (*i.e.* temperatura, pH, anaerobiosis) utilizando un inóculo ruminal, buffer para evitar variaciones significativas del pH, y un ambiente libre de O₂. El líquido ruminal es colectado de al menos 2 o 3 ovinos o bovinos fistulados alimentados con una ración que contenga forraje y concentrado (*e.g.* 60 y 40% respectivamente) para que garantice la representatividad de las diferentes poblaciones microbianas del rumen. El fluido ruminal se extrae llevando tanto fase sólida como líquida de modo de preparar el inóculo con microorganismos adherentes y no adherentes y se transporta al laboratorio garantizando temperatura y anaerobiosis. Los tratamientos bajo estudio son incubados a 39°C típicamente por 24 h, aunque el tiempo varía según el interés del investigador, recolectándose al final el gas producido para analizarlo por cromatografía gaseosa. El metano producido se suele expresar por unidad de materia seca u orgánica incubada o digerida. Las técnicas disponibles abarcan desde tipo batch (*e.g.* Hohenheim, Theodorou) a fermentadores continuos como el RUSITEC (Czerkawski y Breckenridge, 1977).



Figura 3.1. Vista exterior (superior) e interior (inferior) de las cámaras de respiración para medición de emisiones de metano, instaladas en INTA EEA Balcarce

La principal ventaja de los métodos *in vitro* tipo batch radica en su economicidad y capacidad de comparar en forma simultánea (para un mismo inóculo ruminal resultante de la mezcla de líquidos ruminales de 2 o 3 animales), una gran número de tratamientos (*i.e.* alimentos, aditivos, inhibidores, dosis de aditivos; por ejemplo, el laboratorio de la Facultad de Agronomía de la UBA cuenta con la capacidad para testear en duplicado más de 100 tratamientos en forma simultánea, *i.e.* una capacidad de más de 300 fermentadores). De este modo, solo los tratamientos más promisorios pueden luego ser ensayados en fermentadores continuos (tienen menor capacidad de replicación) o *in vivo*.

En comparación con las técnicas *in vivo* se destaca la velocidad en obtener los resultados (en semanas, dado que una incubación suele extenderse entre 24 y 72 h) y la uniformidad de las condiciones microbiológicas y bioquímicas del rumen. Los resultados de producción de metano por esta técnica se asumen que presentan una asociación razonable con los resultados *in vivo* (Bhatta *et al.*, 2006, 2008; Getachew *et al.*, 2005), aunque se han reportado resultados en contrario.

En Argentina, la técnica está disponible en diferentes Universidades y EEA del INTA, y ha sido empleada entre otros objetivos para evaluar forrajes (Avila *et al.*, 2016; Cantet *et al.*, 2015a; Juárez Sequeira *et al.*, 2016), taninos (Cantet *et al.*, 2015b), y enzimas (Cantet *et al.*, 2015a).

Modelos matemáticos

Existe un sinnúmero de modelos matemáticos que pretenden predecir las emisiones de metano en diferentes situaciones y escalas (e.g. intraruminal, por cabeza). Para predecir la producción de metano para grandes regiones o países, el uso de modelos resulta el camino más indicado, por ejemplo, para la elaboración de los inventarios de acuerdo con los lineamientos del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC - "Intergovernmental Panel on Climate Change" dependiente de la ONU). En forma similar, e incluso con otras metodologías (e.g. Análisis de ciclo de vida), los modelos son necesarios para efectuar análisis por producto, o para identificar las contribuciones de un sector productivo a las emisiones totales a escala regional y de país. Asimismo, pueden contribuir a evaluar estrategias de mitigación e impactos a grandes escalas. Además, existen modelos desarrollados para predecir la producción de metano a partir de parámetros bioquímicos ruminales, tales como los basados en la estequiometría descrita por Wolin (1960).

En los últimos años, se han publicado numerosos trabajos de investigación con el objeto de lograr modelos predictivos que permitan refinar el cálculo de las emisiones (Mills *et al.*, 2003; Ellis *et al.*, 2007; Cambra López *et al.*, 2008; Charmley *et al.*, 2015). Para los sistemas de nuestro país, Jaurena *et al.* (2015) desarrollaron un modelo que permitiera estimar las pérdidas de energía como metano "sensible" a los sistemas de producción nacionales. Este modelo predictivo del factor de conversión en metano (**Ym**; ver sección "Cálculos de inventario") se desarrolló con particular atención al tipo de rumiantes y calidad de dietas para nuestro país, y se ajusta a un amplio rango de situaciones encontradas en los sistemas de producción de carne y leche bovina de Argentina (Jaurena *et al.*, 2015).

El análisis bibliográfico puso en evidencia la escasez de resultados para rumiantes menores y con dietas basadas en forrajeras megatérmicas (sólo el 4 % de los datos). Este trabajo determinó que los descriptores de la calidad del alimento más significativos fueron el consumo de materia seca (**CMS**), la fracción fibra insoluble en detergente neutro (**FDN**) y la digestibilidad de la materia seca (**DMS**), que explicaron respectivamente el 40, 39 y 21% de la variación total observada en Ym (Jaurena *et al.*, 2015). El modelo ajustado fue:

$$Ym = \alpha - 0,269 (0,0498) \times CMS + 6,4 \times 10^{-3} (1,13 \times 10^{-3}) \times FDN + 6,4 \times 10^{-3} (1,59 \times 10^{-3}) \times DMS$$

donde: el parámetro estimado (error estándar del parámetro), y la ordenada al origen " α " varió entre 0,03 y 4,81 para las once diferentes situaciones descritas (Biotipo animal $\times$ Fuente de fibra $\times$ Nivel de concentrado). El modelo es sensible a variaciones en características de los animales, a la dieta (Fuente de fibra, Nivel de concentrado, DMS y FDN) y el consumo de materia seca (CMS).

La estrategia propuesta por el IPCC para el cálculo de los inventarios nacionales está explicado en mayor detalle en "Cálculos de inventario según el IPCC".

GASES DE EFECTO INVERNADERO PROVENIENTES DEL ESTIÉRCOL

El estiércol y las excretas de las distintas especies animales contribuyen con GEIs (fundamentalmente NH_3 , N_2O y CH_4), y tienen dos formas de emisión: una de ellas es a partir de la gestión del estiércol y la otra surge de las emisiones directas e indirectas a partir de su aplicación en suelos.

Las mediciones disponibles en nuestro país son relativamente escasas hasta la fecha, sin embargo, en los últimos años, se han desarrollado algunos trabajos con ese objetivo empleando la técnica de la cámara estática que es ampliamente utilizada a nivel mundial dada su simpleza y bajo costo. Básicamente, consiste en determinar la variación de concentración del gas en cuestión a través del tiempo en un recinto cerrado cuyo piso es el suelo y que en la parte superior cuenta con una tapa removible que posee una válvula para la extracción del gas. A modo de ejemplo, en un experimento se utilizan cinco cilindros de PVC (16 cm de diámetro interno y 25 cm de altura, enterrados a 5 cm de profundidad) por potrero colocando 1 kg de la materia fecal a estudiar y acompañados de cinco cilindros como control (flujo de metano desde la interfaz suelo-atmósfera). Las estimaciones se realizaron tomando muestras sucesivas durante una hora por dos o tres días (Parkin y Venterea, 2010), calculado el flujo como la pendiente de la regresión lineal de la variación de concentración de CH_4 dentro de las cámaras en función del tiempo. Los valores hallados fueron muy inferiores a los utilizados en el cálculo del Inventario Nacional Argentino (Cuadro 3.2).

Por otro lado, y en forma análoga a lo explicado para las emisiones entéricas de metano, para los inventarios nacionales se requiere de factores de emisión específicos y que son explicados en la sección “Cálculos de inventario según el IPCC”.

CÁLCULOS DE INVENTARIO SEGÚN EL IPCC

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC - "Intergovernmental Panel on Climate Change" dependiente de la ONU) ha sido el responsable de establecer la técnica de cálculo de los inventarios que permite que los resultados sean comparables. La aplicación de estos procedimientos requiere por ejemplo de la confección de inventarios de poblaciones animales, o superficies dedicadas a una determinada actividad agrícola, y predecir la cantidad de GEIs emitidos por cada una de dichas poblaciones, o unidad de área según correspondiera. La predicción de las cantidades de gas emitidas (e.g. por cabeza de ganado, unidad de superficie) se denomina factor de emisión (**FE**) y exige la disponibilidad de estrategias de cálculo estandarizadas y basadas en parámetros “objetivos” para aplicar dichos valores al conjunto de la región, especie o categoría para la que se desea realizar el cálculo.

Los países que han adherido a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (**CMNUCC**) se han comprometido a comunicar las actividades relacionadas con el cambio climático (Finster, 2014), siendo la confección de los inventarios nacionales de GEI de origen antrópico una de las tareas principales de estos compromisos. El IPCC es el encargado de establecer la técnica de cálculo de los inventarios y, según su versión 2006 (IPCC, 2006) propone tres estrategias de cálculo (Niveles) para estimar las emisiones de CH₄ y N₂O por parte del ganado:

Nivel 1: Método de cálculo simplificado que sólo requiere el tamaño de la población de ganado por especie, subcategoría animal, y el clima de la región, a los cuales se les aplica los FE indicados por el IPCC.

Nivel 2: Este método es más complejo y requiere información detallada sobre las características de los animales o condiciones de producción.

Nivel 3: Se utiliza en algunos países en los que las emisiones del ganado son particularmente importantes, y donde se han desarrollado modelos específicos del país, o empleando métodos basados en mediciones para los FE alternativos y validados propios del país.

El método aplicado depende de la disponibilidad de datos y de las circunstancias nacionales. Independientemente del método elegido, en primer lugar, se debe conocer la población animal por categorías, luego se emplean los valores indicados por el IPCC (Niveles 1 y 2), o se aplican FE específicos del país para cada subcategoría de ganado, según la metodología seleccionada (Nivel 3).

Cada gas tiene un potencial de calentamiento global específico, índice que combina la fuerza radiativa del gas con el tiempo de persistencia en la atmósfera (“GWP” -Global Warming Potential-; índice que mide la fuerza radiativa de un gas por unidad de masa, acumulada a lo largo de un tiempo especificado, relativo al del CO₂). A su vez se entiende por Fuerza Radiativa al cambio en flujo de energía, expresado en watts/m², causado por un determinado gas, y calculado en la tropopausa o en la parte superior de la atmósfera (IPCC, 2014- Annex II Glossary). Consecuentemente para contar con una base objetiva y comparable de las emisiones de los diferentes gases, las emisiones se suelen expresar como Emisión de CO₂-equivalente” (**CO₂-eq.**) que representa la cantidad de CO₂ emitido que causa la misma fuerza radiativa integrada sobre un determinado horizonte temporal. El CO₂-eq. se obtiene multiplicando la emisión de los GEI por su GWP para un determinado período de tiempo. Sin embargo, no existe un consenso absoluto sobre cómo transformar los diferentes gases en CO₂-eq. El IPCC desde su primer informe en 1990 propone el uso del GWP, pero diferentes autores han propuesto y adoptado distintas métricas (e.g. Neubauer y Megonigal, 2015), e incluso en los sucesivos informes del IPCC se han propuesto diferentes valores para el GWP. Otro factor de relevancia es el potencial de cambio de temperatura global (“GTP”, global temperature change potential), que se refiere al cambio de la temperatura global media para un año específico.

Un factor adicional para considerar es el período de años sobre los que se calcula el valor de sustitución entre los gases. El GWP para un período de 100 años fue adoptado por el protocolo de Kioto y es el más frecuentemente utilizado en evaluaciones de políticas climáticas. Sin embargo, la elección de diferentes períodos puede responder a diferentes propósitos del análisis.

Metano entérico

Como fue señalado anteriormente, para la confección del inventario de emisiones es necesario conocer la cantidad de metano emitida por el individuo promedio de la población sobre la que se aplica el cálculo (*i.e.* FE, kg CH₄ cab⁻¹ año⁻¹). El FE en su forma de cálculo simplificada (Nivel 1) se aplica cuando la contribución de la fermentación entérica de los animales es de escasa importancia, o cuando no se dispone de suficiente información. Por ejemplo, para América Latina, en bovinos no lecheros, el FE propuesto es 56 kg CH₄ cab⁻¹ año⁻¹ (supone un promedio ponderado de las emisiones de vacas de cría, toros y novillos —37, 6 y 58% respectivamente—, alimentados en base a pasturas con una digestibilidad media de 60% y con un Ym de 6,5%; datos originados en Brasil; IPCC, 2006, p. 10.79).

Para el caso de las categorías donde el cálculo se efectúa de acuerdo con el Nivel 2, el FE se computa como el producto entre la Ingesta diaria de Energía Bruta y el Ym (Ecuación 3.1).

Ecuación 3.1. Cálculo del Factor de Emisión (FE) para estrategia de cálculo del Nivel 2

$$\text{FE (kg CH}_4 \text{ cab}^{-1} \text{ año}^{-1}) = \text{IEB} \times \text{Ym}/100 \times 365 \text{ d} \times (55,65 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ CH}_4)^{-1}$$

donde:

IEB (MJ d⁻¹): Ingesta de Energía bruta

Ym (%): Factor de conversión de metano

55,65 (MJ kg⁻¹ CH₄): Energía bruta del metano

Como pone en evidencia la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el FE depende de dos variables sujetas a mucha incertidumbre: el CMS y el Ym. Según indica el propio IPCC (2006) "*la mayor exactitud y la identificación de las causas de variación en las emisiones constituyen el meollo del objetivo del inventario*" (IPCC, 2006, p. 10.34) y "*se debe alentar toda acción destinada a mejorar las estimaciones de la ingesta alimentaria y el Ym*" (IPCC, 2006, p. 10.35).

Si bien escapa a los alcances propuestos para este capítulo es necesario considerar que tanto la estimación del consumo, como las necesidades energéticas diarias de los animales deberían ser objeto de un detallado escrutinio para también contribuir a mejorar las estimaciones.

El Ym representa la proporción de la energía bruta del alimento ingerido que se convierte en CH₄, y lejos de ser un valor constante es altamente variable (2-12%; Johnson y Johnson, 1995). En el país no existe un número significativo de valores de Ym medidos en forma directa, razón por la cual para el cálculo de los inventarios se utiliza el Nivel 2 de acuerdo con el IPCC (2006). Los factores que determinan el Ym son dependientes del tipo de animal y categoría, del consumo y de las características del alimento.

Como fuera indicado con anterioridad, para el cálculo de los inventarios nacionales de acuerdo a los lineamientos del IPCC (2006), dependiendo del grado de complejidad que se utilice pueden aplicarse FE tabulados (provistos por la guía de cálculo; *e.g.* 56 kg CH₄ cab⁻¹ año⁻¹ para bovinos no lecheros según el Nivel 1; Cuadro 10.11, IPCC, 2006), o calcular el FE como el producto entre el CMS y el Ym (de acuerdo al Nivel 2). La estimación de las emisiones de metano entérico del sector ganadero en Argentina se ha obtenido aplicando la estrategia de cálculo de Nivel 1 para todas las especies, salvo para el caso de bovinos, a los cuales, por la importancia de la población se aplicó el Nivel 2 (IPCC, 2006).

El IPCC (2006) propone para todos los vacunos o búfalos en cualquier condición de alimentación utilizar como valor Ym 6,5 ± 1%, excepto cuando se alimente con concentrados en una proporción mayor al 90%, en cuyo caso el Ym se reduce a 3,5 ± 1% (para el Nivel 2; Cuadro 10.12, IPCC, 2006). Estos valores son propuestos como orientación para la realización de cálculos del inventario y se sugiere que cuando la calidad de la dieta sea alta se disminuya el valor (pudiendo extenderse entre los límites estipulados (*i.e.* ±1%; *e.g.* 3,5% puede fluctuar entre 2,5 y 4,5%). Consecuentemente, el rango de variación de Ym es: 2,5 a 4,5 y 5,5 a 7,5, donde la elección del Ym presenta un grado importante de subjetividad (en el orden de 29 o 15% según se calcule el impacto para los valores 3,5 y 6,5% respectivamente).

La mayoría de los alimentos utilizados por los rumiantes se puede asumir que tienen un contenido aproximado de EB de 18,4 MJ kg⁻¹ MS, por lo que groseramente cada kg de MS producirá 1,2 MJ d⁻¹ (*i.e.* Ym= 6.5% ± 21,5 g CH₄ d⁻¹); valor similar a los sugeridos por otros autores: 19,1 (Hristov *et al.*, 2013), 19,0 (Cottle *et al.*, 2011), y 19,6 (Kennedy y Charmley, 2012).

El cálculo del Ym de acuerdo con el Nivel 2 es insensible ("ciego") a las variaciones en los tipos de animales, y a cambios en la composición de la dieta, siendo que la calidad de los alimentos y la interacción entre estos y los animales son importantes determinantes del Ym. Sin embargo, la proporción de EB perdida como CH₄ (Ym) está influida por el tipo, peso y edad del animal (Chaokaur *et al.*, 2015), así como por la cantidad (Reynolds *et al.*, 2010) y calidad de los alimentos ingeridos (De Blas *et al.*, 2008; Grainger y Beauchemin, 2011; Jaurena *et al.*, 2015).

Según el IPCC, en los países donde la contribución de la actividad ganadera es importante, sería deseable contar con estimaciones con un grado de refinamiento de Nivel 3. Esta aproximación requeriría *"el desarrollo de modelos sofisticados en los que se considere la composición de la dieta en detalle, la concentración de productos resultado de la fermentación en los rumiantes, las variaciones estacionales de la población animal o de la calidad y disponibilidad de alimentos, y las posibles estrategias de mitigación. Muchas de estas estimaciones se derivarían de mediciones experimentales directas"* (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC, 2006, p. 10.26; ver "Modelos matemáticos").

Gases provenientes del estiércol.

Como fue mencionado previamente el NH₃, N₂O y CH₄ son los principales GEIs emitidos por el estiércol y las excretas de las distintas especies animales, y en forma análoga a lo explicado para las emisiones entéricas de metano su predicción para los inventarios nacionales requiere de FE específicos.

En el último Comunicado Nacional del Inventario de GEIs se utilizaron los lineamientos establecidos en las *Directrices del IPCC de 2006* (D-IPCC 2006), para el grupo bovinos de carne se utilizó la metodología de cálculo en su Nivel 2 (Cuadro 3-1), pero para el resto de las categorías de ganado (bovino lechero, ovinos, porcinos, caprinos, camélidos, aves, búfalos, asnales y mulares, y equinos) se utilizó la metodología de cálculo al Nivel 1 (por ausencia de información local; Cuadro 3.2) que ignora el tipo de estiércol aplicado y proporciona un FE de N₂O común basado en la concentración de N del estiércol.

Cuadro 3.1. Factores de emisión¹ para manejo de estiércol según Nivel 2.

Categorías	FE de CH ₄ (kg CH ₄ cab ⁻¹ año ⁻¹)		FE de N ₂ O (kg N ₂ O cab ⁻¹ año)			
			Directas		Indirectas	
	Cría	Invernada	Cría	Invernada	Cría	Invernada
Pampeana-SE	0,1	0,39	1,34	0,92	0,3	0,23
Pampeana-SO	0,12	0,59	1,40	1,29	0,31	0,25
Pampeana-O	0,57	0,57	1,50	0,69	0,3	0,19
Pampeana-N	0,6	0,52	1,23	1,64	0,21	0,2
NEA	0,61	1,21	0,99	1,78	0,22	0,2
NOA	0,47	0,48	0,99	0,68	0,22	0,33
Semiárida	0,43	0,65	1,09	1,25	0,16	0,03
Patagónica	0,11	0,23	0,03	0,00	0,00	0,00

¹ FE para manejo de estiércol por defecto sugerido por el D-IPCC 2006 (Tercera Comunicación Nacional)

Dentro del sector agricultura, las estimaciones resaltaron la importante contribución de la categoría suelos agrícolas y dentro de ésta, la mayor contribución fue la correspondiente a las emisiones directas e indirectas por excretas animales (40%) para el período 1993-2012.

Los esfuerzos para refinar las predicciones de los FE que cuentan con reconocimiento internacional por parte de nuestro sistema científico y productivo contribuirán a reducir la incertidumbre del inventario nacional y diseñar estrategias de mitigación y adaptación más realistas y efectivas.

Cuadro 3.1. Factores de emisión¹ para manejo del estiércol según Nivel 1.

Categorías	FE de CH ₄ (kg CH ₄ cab ⁻¹ año ⁻¹)		FE de N ₂ O (kg N ₂ O cab ⁻¹ año ⁻¹)	
	Clima frío	Clima templado	Clima frío	Clima templado
Asnales y Murales	0,6	0,9	1,26	0,60
Aves	0,012	0,018	0,00	0,006
Búfalos	1	1	1,26	0,60
Camélidos	1,3	1,9	1,26	0,60
Caprinos	0,11	0,17	1,26	0,60
Equinos	1,1	1,6	1,26	0,60
Ovinos	0,10	0,16	0,28	0,13
Porcinos	0	1	0,07	0,13
Ganado lechero	0	1	0,02	0,01
Ganado no lechero	1	2	-	-

¹ FE para manejo de estiércol por defecto sugerido por el D-IPCC 2006 (Tercera Comunicación Nacional)

DETERMINACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN CON TORRES MICROMETEOROLÓGICAS

Los agroecosistemas ganaderos son una integración compleja de múltiples componentes, los cuales pueden tener actividades tanto de emisión de GEI como de captura. Por ejemplo, los suelos pueden actuar como fuente de emisión de CH₄ o sumidero (captación) dependiendo fundamentalmente del grado de aireación. La técnica conocida como "Eddy covariance" (EC) es de tipo micrometeorológica y resulta de preferencia para la cuantificación de los flujos de GEI a escala de ecosistema (Baldocchi, 2003), ya que es capaz de medir de manera directa y de modo no invasivo el intercambio turbulento de gases en la interfase biosfera-atmósfera. Esta metodología permite arribar a cuantificaciones de los flujos netos de GEI sin distinguir entre las diferentes fuentes, adaptándose para la medición de los balances de GEI a escala de sistema de producción.

En el caso particular de los sistemas ganaderos presenta como ventaja significativa el hecho de que su implementación no requiere la manipulación de los animales y por tanto no altera su comportamiento (Harper *et al.*, 2011), cuantificando las emisiones de GEI del sistema completo en su estado natural. La técnica cuenta con virtudes adicionales, como por ejemplo la de lograr mediciones continuas en el tiempo, permitiendo captar la variabilidad temporal de los flujos de gases. El área muestreada por esta técnica, por su parte, con dimensiones longitudinales que pueden oscilar desde cientos de metros hasta varios kilómetros, permite integrar la variabilidad espacial que suelen mostrar las diversas fuentes de GEI que integran los agroecosistemas.

Entre las limitantes de la técnica es de destacar que debe ser aplicada sobre terrenos planos y que el sistema a evaluar debe ser adecuadamente homogéneo a sotavento de donde se ubica el instrumental. A su vez, el área efectivamente evaluada por la técnica no tiene dimensiones fijas a través del tiempo, resultando determinada por algunos factores que no son manejables (e.g. velocidad y dirección del viento, nivel de turbulencia, estabilidad de la atmósfera), asimismo, el análisis de la información es laborioso debiendo en ocasiones aplicar correcciones de modo que ésta cumpla con los estándares de calidad requeridos (Foken *et al.*, 2012; Papale, 2012). Es importante verificar el área fuente (Hsieh *et al.*, 2000, Kljun *et al.*, 2004) como también los sitios de mayor contribución a los flujos calculados, especialmente cuando la fuente de emisión es móvil, como puede ocurrir con la emisión de metano entérico en sistemas ganaderos.

Con respecto al N₂O, la medición de sus flujos mediante EC es practicable (Neftel *et al.*, 2010; Jones *et al.*, 2011), pero aún no ha logrado una alta difusión debido a limitantes relacionadas fundamentalmente al costo de su instrumentación.

En nuestro país, los antecedentes de aplicación de la técnica de EC se remiten principalmente a estudios llevados adelante sobre sistemas agrícolas, silvícolas, bosques y pastizales no manejados (Posse *et al.*, 2010, 2014, 2016, Ulke *et al.*, 2015, Lewczuk *et al.*, 2017). Sin embargo, esta técnica, aún no ha sido empleada para el estudio de las emisiones de sistemas netamente ganaderos ya que permitiría integrar diferentes mediciones de flujos. De hecho, el empleo de la técnica de EC en algunos sistemas ganaderos pastoriles de climas templados ha permitido demostrar que sus flujos netos negativos (secuestro) de CO₂ pueden contrabalancear, al menos en parte, las emisiones de N₂O y CH₄ resultando en sistemas ganaderos con un balance de GEI menos nocivo (Allard *et al.*, 2007; Skiba *et al.*, 2013; Kirschbaum *et al.*, 2015; Jones *et al.*, 2017).

El secuestro de carbono en el suelo por parte de cultivos y pasturas es considerado, además, una de las medidas de mitigación más efectivas contra el Cambio Climático (Herrero *et al.*, 2016). A nivel local, la primera experiencia evaluando los flujos de intercambio de GEI en un sistema ganadero mediante EC fue lanzada recientemente en la Unidad Integrada Balcarce (UIB, INTA Balcarce-Facultad de Agronomía UNMdeP), estudiando un sistema pastoril de cría y recría bovina basado en pasturas perennes de tipo templado (<http://intainforma.inta.gov.ar/?p=37428>).

CONCLUSIONES

Existe una amplia variedad de técnicas disponibles para realizar estudios sobre las emisiones de GEI, abarcando desde sistemas de laboratorio *in vitro* a sistemas aplicables a escala geográfica. Cada una de estas aproximaciones constituyen herramientas que se complementan con el objetivo de estudiar el complejo fenómeno resultante de las emisiones derivadas de las actividades ganaderas.

A la hora de elegir una técnica particular deberán ponderarse los objetivos perseguidos, junto con las fortalezas y debilidades de cada una de las técnicas disponibles, así como el balance entre costos y beneficios resultantes.

La complejidad de los estudios de la interacción entre la ganadería y el ambiente, obliga no solamente a utilizar las técnicas ya disponibles, sino a prestar atención a nuevos desarrollos o aproximaciones, junto a modelos predictivos que contribuyan a refinar las estimaciones de los inventarios nacionales, el desarrollo de estrategias de mitigación apropiadas, y en definitiva a convertirse en herramientas de aplicación práctica y sencilla para el uso de productores, técnicos y tomadores de decisiones.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLARD, V., SOUSSANA, J.F., FALCIMAGNE, R., BERBIGIER, P., BONNEFOND, J.M., CESCHIA, E., D' HOUR, P., HÉNAULT, C., LAVILLE, P., MARTIN, C. and PINARÉS-PATIÑO, C. 2007. The role of grazing management for the net biome productivity and greenhouse gas budget (CO₂, N₂O and CH₄) of semi-natural grassland. *Agric. Ecosyst. Environ.* 121, 47-58.
- ARROQUY, J.I., HERNÁNDEZ, O., LÓPEZ, A., FISSOLO, H.M., IMAZ, J.A., SARAIVIA, J.J., JULIARENA, M.P., GUZMAN, S. y GONDA, H.L. 2016. Efecto de la performance durante la recría invernal sobre la emisión de metano estival de vaquillonas pastoreando una pastura tropical. *Comunicación. Rev. Arg. Prod. Anim.* 36(1):252.
- AVILA, A.M., VOLTA, B.J., JAURENA, G., ARROQUY, J.I., FISSOLO, H.M. y SOSA, T. 2016. Producción de metano ruminal *in vitro* de hojas de *Prosopis alba* (Argarobo blanco) de distintos orígenes del Chaco Seco, en: 39º Congreso de la Asoc. Argentina de Producción Animal. Tandil (Prov. de Buenos Aires). *Rev. Argentina de la Producción Animal* (ISSN 0326-0550). Vol. 36 Supl. 1.
- BALDOCCHI, D.D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biol.* 9, 479-492.
- BÁRBARO, N., GERE, J., GRATTON, R., RUBIO, R. and WILLIAMS, K. 2008. First measurements of methane emitted by grazing cattle of the Argentinean beef system. *New Zeal. J. Agric. Res.* 51, 209-219. <https://doi.org/10.1080/00288230809510449>
- BERNDT, A., BOLAND, T.M., DEIGHTON, M.H., GERE, J.I., GRAINGER, C., HEGARTY, R.S., IWAASA, A.D., KOOLAARD, J.P., LASSEY, K.R., LUO, D., MARTIN, R.J., MARTIN, C., MOATE, P.J., MOLANO, G., PINARES-PATIÑO, C., RIBAU, B.E., SWAINSON, N.M., WAGHORN, G.C. and WILLIAMS, S.R.O. 2014. Guidelines for

- use of sulphur hexafluoride (SF₆) tracer technique to measure enteric methane emissions from ruminants. Lambert, M.G., ed. New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre, New Zealand. 166pp.
- BHATTA, R., ENISHI, O., TAKUSARI, N., HIGUCHI, K., NONAKA, I. and KURIHARA, M. 2008. Diet effects on methane production by goats and a comparison between measurement methodologies. *J. Agric. Sci.* 146, 705–715.
- BHATTA, R., TAJIMA, K., TAKUSARI, N., HIGUCHI, K., ENISHI, O. and KURIHARA, M. 2006. Comparison of sulfur hexafluoride tracer technique, rumen simulation technique and *in vitro* gas production techniques for methane production from ruminant feeds, *In: Int. Congr. Ser.* pp. 58–61.
- CAMBRA-LÓPEZ, M., GARCÍA REBOLLAR, P., ESTELLÉS, F. y TORRES, A. 2008. Estimación de las emisiones de los rumiantes en España: EL FACTOR DE CONVERSIÓN DE METANO. *Arch. Zootec.* 57, 89–101.
- CANTET, J.M., COLOMBATTO, D. and JAURENA, G. 2015a. Methane production and *in vitro* digestibility of low quality forages treated with a protease or a cellulase. *Anim. Prod. Sci.* 56, 1700–1706. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1071/AN14988>
- CANTET, J.M., NEUMANN REITER, A.M., MARTINEZ, R.S., COLOMBATTO, D., WAWRZKIEWICZ, M. y JAURENA, G. 2015b. Efecto de la adición de taninos condensados de quebracho en la producción de metano *in vitro*, en: 38° Congreso de la Asoc. Argentina de Producción Animal, 2325 de setiembre. *Rev. Argentina de Producción Animal* (ISSN 0326-0550). Santa Rosa, La Pampa (Argentina).
- CHAGUNDA, M.G.G., ROSS, D., ROOKE, J., YAN, T., DOUGLAS, J.L., PORET, L., McEWAN, N.R., TEERANAVATTANAKUL, P. and ROBERTS, D.J. 2013. Measurement of enteric methane from ruminants using a hand-held laser methane detector. *Acta Agric. Scand. A: Anim. Sci.*, 63:68–75.
- CHAOKAUR, A., NISHIDA, T., PHAOWPHAISAL, I. and SOMMART, K. 2015. Effects of feeding level on methane emissions and energy utilization of Brahman cattle in the tropics. *Agric. Ecosyst. Environ.* 199, 225–230. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2014.09.014>
- CHARMLEY, E., WILLIAMS, S.R.O., MOATE, P.J., HEGARTY, R.S., HERD, R.M., ODDY, V.H., REYENGA, P., STAUNTON, K.M., ANDERSON, A. and HANNAH, M.C. 2015. A universal equation to predict methane production of forage-fed cattle in Australia. *Anim. Prod. Sci.*
- COTTLE, D.J., NOLAN, J.V. and WIEDEMANN, S.G. 2011. Ruminant enteric methane mitigation : a review 491–514.
- CZERKAWSKI, J.W. and BRECKENRIDGE, G. 1977. Design and development of long-term rumen simulation technique (RUSITEC). *Br. J. Nutr.* 38, 271–384.
- De BLAS, C., GARCÍA REBOLLAR, P., CAMBRA LÓPEZ, M. y TORRES, A.G. 2008. Contribución de los rumiantes a las emisiones de gases con efecto invernadero, *In: Rebollar, P.G.; de Blas, C.; Mateos, G.G. (Eds.), XXIV Curso de Especialización FEDNA - Avances En Nutrición y Alimentación Animal*. Madrid (España), pp. 109–117.
- DEIGHTON, M.H., WILLIAMS, S.R.O., HANNAH, M.C., ECKARD, R.J., BOLAND, T.M., WALES, W.J. and MOATE, P.J. 2014. A modified sulphur hexafluoride tracer technique enables accurate determination of enteric methane emissions from ruminants. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 197:47–63.
- ELLIS, J.L., KEBREAB, E., ODONGO, N.E., McBRIDE, B.W., OKINE, E.K. and FRANCE, J. 2007. Prediction of Methane Production from Dairy and Beef Cattle. *J. Dairy Sci.* 90, 3456–3466.
- FINSTER, L. 2014. Capítulo 16. Inventario de emisiones de GEI provenientes de la ganadería, *In: Medina, C.P.; Zubillaga, M. de las M.; Taboada, M.A. (Eds.), Suelos, Producción Agropecuaria y Cambio Climático*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca Asociación Argentina de Producción animal (AAPA) Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS), Buenos Aires, pp. 208–215.
- FOKEN, T., LEUNING, R., ONCLEY, S., MAUDER, M. and AUBINET, M. 2012. Corrections and data quality control. *In: Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*, editado por: Aubinet M, Vesala T y Papale D, pp.85–131, Springer, Dordrecht.
- GARNSWORTHY, P.C., CRAIGON, J., HERNANDEZ-MEDRANO, J.H. and SAUNDERS, N. 2012. On-farm methane measurements during milking correlate with total methane production by individual dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 95:3166–3180.
- GERBER, P.J., STEINFELD, H., HENDERSON, B., MOTTET, A., OPIO, C., DIJKMAN, J., FALCUCCI, A. and TEMPIO, G. 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome (Italy).

- GERE, J.I. and GRATTON, R. 2010. Simple, low-cost flow controllers for time averaged atmospheric sampling and other applications. *Latin Am. App. Res.*, 40:377-381.
- GERE, J.I., BUALÓ, R.A., PERINI, A.L., ARIAS, R.D., ORTEGA, F.M., WULFF, A.E. and BERRA, G. 2019. Methane emission factors for beef cows in Argentina: effect of diet quality. *New Zealand J. Agric. Res.* DOI: 10.1080/00288233.2019.1621355.
- GETACHEW, G., ROBINSON, P.H., DePETERS, E.J., TAYLOR, S.J., GISI, D.D., HIGGINBOTHAM, G.E. and RIORDAN, T.J. 2005. Methane production from commercial dairy rations estimated using an *in vitro* gas technique. *Anim. Feed Sci. Technol.* 123–124, 391–402. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.04.056>
- GOOPY, J.P., CHANG, C. and TOMKINS, N. 2016. Chapter 5: A Comparison of Methodologies for Measuring Methane Emissions from Ruminants. *In: T.S. Rosenstock et al. (eds.). Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture.* DOI 10.1007/978-3-319-29794-1_5.
- GRAINGER, C. and BEAUCHEMIN, K.A. 2011. Can enteric methane emissions from ruminants be lowered without lowering their production? *Anim. Feed Sci. Technol.* 166-167, 308-320. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.021>
- HAMMOND, K.J., CROMPTON, L.A., BANNINK, A., DIJKSTRA, J., YÁÑEZ-RUIZ, D.R., O'KIELY, P., KEBREAB, E., EUGENÈ, M.A., YU, Z., SHINGFIELD, K.J., SCHWARM, A., HRISTOV, A.N. and REYNOLDS, C.K. 2016. Review of current *in vivo* measurement techniques for quantifying enteric methane emission from ruminants. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 219:13–30
- HARPER, L.A., DENMEAD O.T. and FLESCH T.K. 2011. Micrometeorological techniques for measurement of enteric greenhouse gas emissions. *Anim. Feed Sci. Technol.* 166–167, 227–239.
- HEGARTY, R.S. 2013. Applicability of short-term emission measurements for on-farm quantification of enteric methane. *Animal*, 7:401–408.
- HERNÁNDEZ, O., LÓPEZ, A., FISSOLO, H.M., JULIARENA, M.P., GUZMÁN, S.A., GONDA, H.L. y ARROQUY, J.I. 2016. Suplementación con granos de maíz secos de destilería. 2. Efecto sobre la producción de metano de terneras recriadas a base de heno de *Panicum máximum* (cv. Gatton panic) de baja calidad. *Rev. Arg. Prod. Anim.*, 36(1):243.
- HERRERO, M., HENDERSON, B., HAVLIK, P., THORNTON, P.K., CONANT, R.T., SMITH, P., WIRSENIUS, S., HRISTOV, A.N., GERBER, P., GILL, M., BUTTERBACH-BAHL, K., VALIN H., GARNETT, T. and STEHFEST, E. 2016. *Nature Clim. Change* 6, 452-461.
- HRISTOV, A.N., OH, J., FIRKINS, J.L., DIJKSTRA, J., KEBREAB, E., WAGHORN, G., MAKKAR, H.P.S., ADESOGAN, A.T., YANG, W., LEE, C., GERBER, P.J., HENDERSON, B. and TRICARICO, J.M. 2013. SPECIAL TOPICS — Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations : I . A review of enteric methane mitigation options 1. *J. Anim. Sci.* 91, 5045-5069. <https://doi.org/10.2527/jas2013-6583>
- HSIEH CHENG, I., KATUL, G. and CHI, T. 2000. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. *Adv. Water Res.* 23, 765-772.
- IPCC. 2006. Intergovernmental Panel on Climate Change - Capítulo 10: Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol, *In: IPCC (Ed.), Directrices Para Los Inventarios Nacionales GEI - V4 Chapter 10.* p. 10.1-10.91.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pachauri, ed. IPCC, Geneva (Switzerland).
- JAURENA, G., CANTET, J.M., ARROQUY, J.I., PALLADINO, R.A., WAWRZKIEWICZ, M. and COLOMBATTO, D. 2015. Prediction of the Ym factor for livestock from on-farm accessible data. *Livest. Sci.* 177, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2015.04.009>
- JOHNSON, K.A., HUYLER, M., WESTBERG, H., LAMB, B. and ZIMMERMAN, P. 1994. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF6 tracer technique. *Environ. Sci. Technol.* 28:359–362.
- JOHNSON, K.A. y JOHNSON, D.E. 1995. Methane emissions from cattle. *J. Anim. Sci.* 73, 2483–2492.
- JONES, S.K., FAMULARI, D., Di MARCO, C.F., NEMITZ, E., SKIBA, U.M., REES, R.M. and SUTTON, M.A. 2011. Nitrous oxide emissions from managed grassland: a comparison of eddy covariance and static chamber measurements. *Atmos. Meas. Tech.* 4, 2179-2194.

- JONES, S.K., HELFTER, C., ANDERSON, M., COYLE, M., CAMPBELL, C., FAMULARI, D., Di MARCO, C., van DIJK, N., TANG, Y.S., TOPP, C.F.E., KIESE, R., KINDLER, R., SIEMENS, J., SCHRUMPF, M., KAISER, K., NEMITZ, E., LEVY, P.E., REES, R.M., SUTTON, M.A. and SKIBA U.M. 2017. The nitrogen, carbon, and greenhouse gas budget of a grazed, cut and fertilized temperate grassland. *Biogeosci.* 14, 2069-2088.
- JONKER, A., HICKEY, S.M., McEWAN, J.C., ROWE, S.J., JANSSEN, P.H., MacLEAN, S., SANDOVAL, E., LEWIS, S., KJESTRUP, H., MOLANO, G., AGNEW, M., YOUNG, E.A., DODDS, K.G., KNOWLER, K. and PINARES-PATIÑO, C.S. 2019. Genetic parameters of plasma and ruminal volatile fatty acids in sheep fed alfalfa pellets and genetic correlations with enteric methane emissions. *J. Anim. Sci.* 97, 2711-2724. <https://doi.org/10.1093/jas/skz162>
- JUÁREZ SEQUEIRA, A., LÓPEZ, A., FISSOLO, H.M., JAURENA, G. y ARROQUY, J.I. 2016. Follaje de especies nativas como potenciales inhibidoras de la producción ruminal *in vitro* de sulfuro de hidrógeno y metano, *In: 39° Congreso Argentino de Producción Animal.* p. NA7.
- KENNEDY, P.M. and CHARMLEY, E. 2012. Methane yields from Brahman cattle fed tropical grasses and legumes. *Animal Production Science*, 52(4), 225-239.
- KIRSCHBAUM, M.U.F., RUTLEDGE, S., KUIJPER, I.A., MUDGE, P.L., PUCHE, N., WALL, A.M., ROACH, C.G., SCHIPPER, L.A. and CAMPBELL, D.I. 2015. Modelling carbon and water exchange of a grazed pasture in New Zealand constrained by eddy covariance measurements. *Sci. Total Env.* 512-513, 273-286.
- KLJUN, N., CALANCA, P., ROTACH, M.W. and, SCHMID H.P. 2004. A simple parameterization for flux footprint predictions. *Bound. Layer Meteorol.*, 112, 503-523.
- LASSEY, K.R., PINARES-PATIÑO, C.S., MARTIN, R.J., MOLANO, G. and McMILLAN, A.M.S. 2011. Enteric methane emission rates determined by the SF₆ tracer technique: Temporal patterns and averaging periods', *Anim. Feed Sci. Technol.* 166-67:183-191.
- LAUBACH J. and KELLIHER, J.M. 2005. Methane emissions from dairy cows: comparing open-path laser measurements to profile-based techniques. *Agr. Forest Meteorol.*, 135:340-345.
- LEWCZUK, N.A., POSSE, G., RICHTER, K. and ACHKAR, A. 2017. CO₂ and N₂O flux balance on soybean fields during growth and fallow periods in the Argentine Pampas—A study case. *Soil Till. Res.* 169, 65-70.
- LOCKYER, D.R. and JARVIS, S.C. 1995. The measurement of methane losses from grazing animals. *Environ. Pollut.*, 90:383-390
- LOTO, M. 2019. Intensidad de emisiones de metano en sistemas de producción de carne con destete hiperprecoz. Tesis para optar al grado de MSc. FCA, Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, 12 de Junio de 2019.
- MAKKAR, H.P.S. and VERCOE, P.E. (Eds.), 2007. Measuring methane production from ruminants. Springer, Dordrecht (The Netherlands).
- MILLS, J.A.N., KEBREAB, E., YATES, C.M., CROMPTON, L.A., CAMMELL, S.B., DHANOA, M.S., AGNEW, R.E. and FRANCE, J. 2003. Alternative approaches to predicting methane emissions from dairy cows. *J. Anim. Sci.* 81, 3141-3150.
- NEFTEL, A., AMMANN, C., FISCHER, C., SPIRIG, C., CONEN, F., EMMENEGGER, L., TUZSON, B. and WAHLEN, S. 2010. N₂O exchange over managed grassland: application of a quantum cascade laser spectrometer for micrometeorological flux measurements. *Agric. For. Meteorol.* 150, 775-785.
- NEUBAUER, S.C. and MEGONIGAL, J.P. 2015. Moving Beyond Global Warming Potentials to Quantify the Climatic Role of Ecosystems. *Ecosystems* 18, 1000-1013. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9879-4>
- PAPALE, D. 2012. Data Gap Filling. *In: Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*, editado por Aubinet M, Vesala T y Papale D, pp159-172. Springer, Dordrecht.
- PARKIN, T.B. and VENTEREA, R.T. 2010. USDA-ARS GRACEnet Project Protocols Chapter 3. Chamber-Based Trace Gas Flux Measurements 4, *In: Flux.* pp. 1-39.
- PATRA, A.K. 2016. Recent advances in measurement and dietary mitigation of enteric methane emissions in ruminants. *Front. Vet. Sci.* 3:39.
- PINARES-PATIÑO, C.S. and CLARK, H. 2008. Reliability of the sulfur hexafluoride tracer technique for methane emission measurement from individual animals: an overview. *Aust. J. Exp. Agric.*, 48:223-229.
- PINARES-PATIÑO, C.S., LASSEY, K.R., MARTIN, R.J., MOLANO, G., FERNANDEZ, M., MacLEAN, S., SANDOVAL, E., LUO, D. and CLARK, H. 2011. Assessment of the sulphur hexafluoride (SF₆) tracer technique using respiration chambers for estimation of methane emissions from sheep. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 166-167:201-209.

- PINARES-PATIÑO, C. and WAGHORN, G. 2012. Technical Manual on Respiration Chamber Designs. Ministry of Agriculture and Forestry.
- PLACE, S.E., PAN, Y., ZHAO, Y. and MITLOEHNER, F.M. 2011. Construction and operation of a ventilated hood system for measuring greenhouse gas and volatile organic compound emissions from cattle. *Animal*, 1:433–46.
- POSSE, G., LEWCZUK, N.A., RICHTER, K. and CRISTIANO, P. 2016. Carbon and water vapor balance in a subtropical pine plantation. *iForest* 9, 736-742.
- POSSE, G., RICHTER, K., CORIN, J.M., LEWCZUK, N.A., ACHKAR, A. and REBELLA, C. 2010. Carbon dioxide fluxes on a soybean field in Argentina: influence of crop growth stages. *Open Agric. J.* 4, 58-63.
- POSSE, G., RICHTER, K., LEWCZUK, N.A., CRISTIANO, P.M., GATTINONI, N., REBELLA, C. and ACHKAR, A. 2014. Attribution of carbon dioxide fluxes to crop types in a heterogeneous agricultural landscape of Argentina. *Env. Mod.ASSE.* 19, 361-372.
- REYNOLDS, C.K., MILLS, J.A.N., CROMPTON, L.A., GIVENS, D.I. and BANNINK, A. 2010. Ruminant nutrition regimes reduce greenhouse gas emissions in dairy cows, *In: Crovetto, G.M. (Ed.), Energy and Protein Metabolism and Nutrition.* Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, pp. 427–437.
- RICCI, P., CERÓN-CUCHI, M., JEWEROWICZ, F., PIJUAN, M., FASCIGLIONE, M., ORTIZ-CHURA, A., CRAVERO, S., MAGLIETTI, C. y PAVAN, E. 2017. Emisiones de metano y microbiota ruminal de novillos en pastoreo con distinta suplementación en la Pampa húmeda, Argentina. Libro de resúmenes de la 3ª Conferencia de gases de efecto invernadero en sistemas agropecuarios de Latinoamérica, 4 al 6 de octubre, INIA La Estanzuela, Uruguay. Pág. 82.
- RICCI, P., CHAGUNDA, M.G.G., ROOKE, J., HOUDIJK, J.G., DUTHIE, C.A., HYSLOP, J., ROEHE, R. and WATERHOUSE, A. 2014. Evaluation of the laser methane detector to estimate methane emissions from ewes and steers. *J. Anim. Sci.*, 92:5239–5250.
- RICCI, P., TESTA, M.L., ALONSO-RAMOS, S., MAGLIETTI, C.S., PAVAN, E., JULIARENA, P., GUZMÁN, S., LOMBARDI, B. y GONDA, H.L. 2018a. Reducción de la intensidad de emisiones de metano en respuesta a la suplementación energética en pastoreo. *Rev. Arg. Prod. Anim.*, 38(1):341.
- RICCI, P., TESTA, M.L., JEWEROWICZ, F., PIJUAN, M., JULIARENA, P., GUZMÁN, S., MAGLIETTI, C.S. y PAVAN, E. 2018b. Efecto del tipo de suplementación en recría pastoril sobre la respuesta productiva y emisiones de metano de novillos. *Rev. Arg. Prod. Anim.*, 38(1):342.
- SKIBA, U., JONES, S.K., DREWER, J., HELFTER, C., ANDERSON, M., DINSMORE, K., MCKENZIE, R., NEMITZ, E. and SUTTON, M.A. 2013. Comparison of soil greenhouse gas fluxes from extensive and intensive grazing in a temperate maritime climate. *Biogeosci.* 10, 1231-1241.
- STORM, I.M.L.D., HELLWING, A.L.F., NIELSEN, N.I. and MADSEN, J. 2012. Methods for measuring and estimating methane emission from ruminants. *Animals*, 2(2):160-183.
- TROY, S., ROOKE, J.A., DUTHIE, C.A., ROSS, D., HYSLOP, J.J., ROEHE, R. and WATERHOUSE, T. 2013. Measurement of methane from finishing cattle fed either a forage-based or high concentrate diet from both feeder-mounted samplers and respiration chambers. *Adv. Anim. Biosci.*, 4:551.
- ULKE, A.G., GATTINONI, N. and POSSE, G. 2015. Analysis and modelling of turbulent fluxes in two different ecosystems in Argentina. *Int. J. Env. Poll.* 58, 52-62.
- WASHBURN, L.E. and BRODY, S. 1937. Growth and development XLII. Methane, hydrogen, and carbon dioxide production in the digestive tract of ruminants in relation to the respiratory exchange. *In: Mumford, F.B. (Ed.), Growth and Development.* University of Missouri, Colombia, Missouri.
- WOLIN, M.J. 1960. A theoretical rumen fermentation balance. *J. Dairy Sci.* 43, 1452–1459.
- ZIMMERMAN, P.R. and ZIMMERMAN, R.S. 2012. Method and system for monitoring and reducing ruminant methane production. United States Pat. No. US20090288606 A1. P. R.
- ZIMMERMAN, P.R. 1993. System for measuring metabolic gas emissions from animals. United States Patent number US005265618A.