

AGROECOSISTEMAS

Caracterización, implicancias ambientales y socioeconómicas



Patricia Lilia Fernández y Patricia Beatriz Lombardo
(coordinadoras)



EDITORIAL FACULTAD DE AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Fernández, Patricia Lilia

Agroecosistemas: caracterización, implicancias ambientales y socioeconómicas / Patricia Lilia Fernández; Patricia Lombardo; coordinación general de Patricia Lilia Fernández; Patricia Lombardo. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía, 2022.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-3738-38-8

1. Agroecosistemas. I. Lombardo, Patricia. II. Título.

CDD 631.583

FACULTAD DE AGRONOMÍA

Universidad de Buenos Aires

EDITORIAL FACULTAD DE AGRONOMÍA

Primera Edición: Agosto 2022

Queda hecho el depósito que marca la ley 11.743

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción o uso tanto en español o en cualquier otro idioma, en todo o en parte por ningún medio mecánico o electrónico, para uso público o privado, sin la previa autorización por escrito de la editorial y los autores.

ISBN 978-987-3738-38-8



EDITORIAL FACULTAD DE AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Avda. San Martín 4453 – (1417) Bs As, Argentina
e-mail: efa@agro.uba.ar

Presentación del libro



Patricia B. Lombardo

Este libro es el resultado del trabajo conjunto de un equipo de docentes-investigadores pertenecientes a la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires que, desde distintas disciplinas, asumen el compromiso de analizar los agroecosistemas como un todo integrado y no como la mera suma de sus partes. En esta nueva versión se han actualizado capítulos presentes anteriormente y se han agregado otros, todo lo cual permitirá una comprensión más profunda sobre los temas a desarrollar.

El eje temático que orienta los capítulos, se fundamenta en la concepción del agroecosistema como un sistema susceptible de ser analizado desde las múltiples propiedades e interacciones que lo configuran y reconfiguran.

El primer capítulo, elaborado por **Patricia Fernández**, representa una aproximación al objeto de estudio: el agroecosistema. El estudio de este ecosistema natural “subsidiado por el hombre”, se realiza desde una visión holística. En este marco, la autora brinda los elementos esenciales para un análisis funcional a partir de distintas dimensiones y sus consiguientes interrelaciones, asumiendo la responsabilidad de “ponernos en tema”.

En un segundo capítulo, esta misma autora, profundiza en la teoría de sistemas para el estudio de los agroecosistemas. De este modo, el capítulo transita desde los componentes y la estructura hasta llegar a la descripción de los procesos, niveles de análisis y funciones de los sistemas.

Los seis capítulos siguientes, discurren por distintos sistemas productivos de importancia estratégica en el sector agropecuario argentino (agrícola, ganadero, forestal, hortícola, frutícola y producción orgánica).

En el capítulo correspondiente a los sistemas de producción agrícola, **Patricia Fernández** parte de la descripción de las etapas básicas del ciclo agrícola haciendo énfasis en cuatro cultivos (trigo, maíz, soja y girasol) y sus respectivas características, para luego analizar los distintos sistemas de labranza -especificando sus ventajas y desventajas- así como los agroquímicos utilizados con énfasis en la cantidad y calidad en la producción de granos.

Alejandra Acosta, es la encargada de tratar analíticamente el sistema productivo ganadero. En primer término, caracteriza las diferentes regiones donde se produce ganado vacuno tomando en cuenta ciertas variables. Posteriormente, hace hincapié en cómo se desarrolla la actividad de cría en nuestro país explicitando las principales pautas que inciden sobre la eficiencia alcanzada la cual se traduce en indicadores de diverso tipo. Por último, discute los diferentes planteos de la actividad de invernada discriminados en extensivo, semi-intensivo e intensivo, los indicadores productivos y las implicancias ambientales de estos sistemas de producción.

Esta autora, en un capítulo posterior, analiza el sistema de producción de leche bovina, describiendo las principales cuencas lecheras para adentrarse luego en la caracterización de la producción, los indicadores de eficiencia, los distintos regímenes alimentarios del ganado así como el impacto ambiental que resulta de la producción.

Esteban Borodwski, es el responsable del capítulo dedicado a los sistemas forestales. El autor introduce una serie de conceptos generales, que facilitarán la lectura posterior, permitiendo plantear distinciones entre especies nativas y exóticas, bosques, forestación, reforestación y plantación forestal. A partir de casos concretos, realiza un análisis comparativo entre un bosque nativo y una plantación forestal resaltando sus características, las funciones que cumplen, los riesgos a que están sometidos así como su regionalización. Asimismo, señala las causas y consecuencias de la deforestación. Por último, define y clasifica los sistemas agroforestales los cuales representan asociaciones entre especies leñosas, herbáceas y/o animales.

En el capítulo 7, **Marcela Harris y Christian Krizaj** analizan los sistemas de producción hortícola comenzando por las características generales que presentan las hortalizas, para continuar por la importancia de la horticultura en la Argentina, las regiones productoras, los distintos sistemas de producción y su análisis mediante un enfoque socio-tecnológico, identificando finalmente las externalidades de los agroecosistemas hortícolas.

En el siguiente capítulo, **Georgina García Inza** aborda el estudio de los sistemas de producción frutícolas, poniendo énfasis en la caracterización general de la actividad, las especies frutales que se cultivan en el país, la descripción de las cadenas productivas, las diversas etapas que atraviesa el cultivo y las prácticas de manejo. Posteriormente, recorre los principales cultivos frutícolas (vid, olivo, frutales de pepita, cítricos, frutales de carozo, etc.) y resalta el cambio de paradigma a partir de la producción agroecológica.

El capítulo elaborado por **Helena Rimski-Korsakov junto con Carina Álvarez y Patricia Fernández**, está centrado en la producción orgánica como una alternativa al modelo productivo convencional y hegemónico. Para ello se detalla la normativa concerniente a esta producción y su definición acerca de los principios generales, los lineamientos a seguir y las modalidades de comercialización. También distingue los principales países productores y consumidores, para finalizar en la comparación de los rendimientos obtenidos entre las producciones orgánicas y convencionales.

Desde una perspectiva socioeconómica, en los capítulos 10 y 11 **Patricia Lombardo** indaga, por un lado, sobre el papel de la tecnología y las transformaciones derivadas de su adopción en el agro pampeano y, por el otro, las transformaciones, consecuencias y alternativas que se consideran en el estudio del sistema agroalimentario argentino.

En el capítulo 10, la autora hace hincapié en los cambios tecnológicos producidos en la región pampeana, teniendo en cuenta los contextos en que los mismos se originaron. La perspectiva histórica de estos cambios contempla varias etapas y en cada una de ellas se especifican las condiciones políticas, económicas, sociales y productivas que incidieron en la generación de las tecnologías adoptadas por los productores agropecuarios. Mientras que el capítulo 11, está centrado en el Sistema Agroalimentario Argentino y los significativos cambios ocurridos a partir de la década del '90. Desde una noción de sistema agroalimentario como un entramado de actividades y actores vinculados por relaciones de producción y mercado, se destaca el estudio pormenorizado de la industria agroalimentaria, la distribución minorista y el modelo de consumo argentino.

En el capítulo 12, **Francisco Pescio** aborda en profundidad la agricultura post-industrial -esbozada sintéticamente en el capítulo 10- señalando sus principales características, el debate existente entre crecimiento demográfico, producción agraria y el abastecimiento de alimentos, el acceso a dichos

alimentos, los costos de los mismos y el rol que cumple la tecnología así como el impacto ambiental de la agricultura post-industrial.

En el capítulo 13, también a cargo de Pescio, a partir de las tensiones identificadas en el capítulo anterior, se analizan propuestas alternativas. Una de esas alternativas se refiere a la Soberanía Alimentaria, cuya definición ha evolucionado a través del tiempo y en ese contexto se centra la mirada en una forma concreta como es la Agroecología.

El capítulo 14 es responsabilidad de **Patricia Fernández y Filipe Behrends Kraemer**, quienes enfocan su análisis en los procesos de deterioro y tipos de degradación de tierras así como la conservación del suelo por su carácter de recurso fundamental en los agroecosistemas. Es así que describen detalladamente dichos procesos, resaltando el nivel de complejidad que pueden alcanzar, las múltiples formas de manifestarse y su relación con la calidad de los suelos. Con respecto a este último punto, realizan una distinción entre los indicadores que permiten evaluar la capacidad funcional del suelo.

En el siguiente capítulo, **Eduardo Musacchio y Luciana Couso** toman como eje central de su estudio a la semilla como base de los agroecosistemas. Biodiversidad, mejoramiento genético vegetal, agrobiotecnología, propiedad intelectual de semillas, son algunos de los tópicos de este estudio el cual adjudica a la semilla un rol central dentro del sistema productivo y en las diferentes modalidades de producción agrarias.

El capítulo 16, a cargo de **Helena Rimski-Korsakov y Raúl Lavado**, está dedicado al impacto del uso de fertilizantes en los agroecosistemas considerando que, a partir del avance e intensificación de la producción agrícola, se incrementa progresivamente su utilización con el propósito de reponer los nutrientes extraídos y mantenerlos acorde a los niveles de producción. La definición y clasificación de los fertilizantes de síntesis inorgánica -sin dejar de lado los abonos orgánicos-, la evolución del uso de los mismos, sus principales características y alternativas de producción, los diferentes objetivos de la fertilización, las alternativas tecnológicas en la aplicación de fertilizantes y la eficiencia de su utilización así como la generación de problemas ambientales derivados de su uso son los temas que componen este capítulo.

El manejo de adversidades biológicas en los cultivos es la problemática que abordan, en el capítulo 17, **Damián Vega y Norma Gorosito** quienes asumen que este manejo requiere de diversas estrategias que pueden ser utilizadas en forma integrada. La reflexión crítica sobre manejo integrado y la consideración del manejo agroecológico como un abordaje alternativo que no requiere el uso de agrotóxicos, que es viable económicamente, socialmente justo, que cuida la naturaleza y la salud, son parte esencial del desarrollo de este capítulo.

En los siguientes capítulos se hace hincapié, por un lado, sobre las principales consecuencias de la intervención del hombre sobre el suelo, el agua y la atmósfera; por otro lado, se analizan las metodologías de diagnóstico en suelos y aguas así como sus posibles soluciones técnicas, destacándose entre estas últimas los avances tecnológicos propuestos por la de agricultura de precisión.

En los capítulos 18 al 20, se indaga sobre las consecuencias de la actividad humana sobre el suelo, la atmósfera y el agua. El suelo, a diferencia de la atmósfera y el agua, posee la capacidad de retener una gran cantidad de contaminantes y a su vez cumple una función depuradora evitando que lleguen a las aguas. Es así que **Patricia Fernández y Filipe Behrends Kraemer** realizan un análisis pormenorizado del ciclado de micronutrientes y del origen de los elementos potencialmente tóxicos, así

como de los factores que influyen en su comportamiento. El suelo es el receptor de los contaminantes que ingresan al agroecosistema por el uso continuado de fertilizantes inorgánicos, abonos orgánicos, plaguicidas, etc. Entre los plaguicidas, se describen las propiedades físico-químicas que inciden en su destino y transporte así como en las características de los suelos que afectan su dinámica.

Con respecto a las consecuencias sobre las aguas, en primer término, **Patricia Fernández y Susana Urricariet** conciben a la huella hídrica como un indicador del uso -directo e indirecto- del agua por parte de los productores que permite demostrar el impacto humano sobre los sistemas hídricos. Asimismo, profundizan sobre los tipos de contaminación y los agentes causantes de los mismos, sobre ciertos casos de relevancia local que ponen de manifiesto el efecto de la actividad antrópica en el agua superficial o subterránea (lixiviación, erosión, contaminación y salinización). Por último, realizan una distinción entre diferentes indicadores de calidad de aguas (físicos, químicos y biológicos) y los criterios utilizados para su selección.

En el caso de los efectos sobre la atmósfera, **Patricia Fernández y Tomás Della Chiesa**, consideran que la contaminación atmosférica es el producto de la intervención del hombre a través de procesos de combustión, cambios en el uso del suelo, prácticas de manejo, entre otros; diferenciando contaminantes gaseosos primarios y secundarios pero prestando especial interés en aquellos gases que contribuyen al efecto invernadero. Si bien los gases más importantes están presentes en la atmósfera de manera natural, las acciones humanas pueden modificar sus concentraciones. Entre los mecanismos de reducción de las emisiones contaminantes al medio ambiente, se analizan las alternativas de los diversos sistemas de producción y los bonos o créditos de carbono propuestos en el marco del Protocolo de Kyoto.

Posteriormente, **Claudia Sainato** se aboca al estudio de las metodologías geofísicas destinadas a la evaluación de la contaminación en suelos y aguas. Dentro de los métodos geofísicos más difundidos se deben considerar los eléctricos y los electromagnéticos. Finalmente, se hace referencia a las aplicaciones de la agricultura de precisión que puede considerarse como una tecnología de proceso que permite reducir el impacto ambiental vinculado a la actividad agropecuaria, disminuyendo fundamentalmente el riesgo de contaminación de suelos y aguas incrementando la eficiencia en la utilización de los insumos.

En el capítulo 22, **María del Pilar Muschietti Piana y Susana Urricariet** retoman la temática de la agricultura de precisión, destacando la importancia alcanzada a nivel nacional que se manifiesta en la tendencia creciente en el uso de ciertas herramientas específicas. Las autoras describen las cuatro etapas que atraviesa la implementación de la tecnología en cuestión, partiendo de la recolección y sistematización de información, siguiendo luego su procesamiento y análisis, llegando finalmente a la etapa de planificación y aplicación variable de insumos. El manejo sitio-específico se desarrolla para la aplicación variable de insumos de mayor difusión en el país. Es de interés de las autoras, en un estudio de caso, realizar un análisis crítico de las implicancias económicas y ambientales de esta tecnología.

Por último, en el capítulo anexo **María del Pilar Muschietti Piana y Patricia Fernández** desarrollan los ciclos biogeoquímicos de carbono, nitrógeno y fósforo con énfasis en los servicios ecosistémicos. Las decisiones de manejo de los agroecosistemas, que impactan en los distintos procesos, son valoradas en este capítulo para los diversos flujos de entrada y salida de dichos nutrientes.

Agradecemos a Marcela Harris, Damián Vega y Stefano Salinas Chaparro por las hermosas fotos que nos han facilitado para ilustrar la tapa del presente libro.

Autoras y autores



Alejandra P. G. Acosta: Ingeniera Agrónoma (FAUBA). Docteur Mention Biologie-Agronomie (Ecole Nationale Supérieure Agronomique Rennes, France). Profesora Asociada de la Cátedra de Bovinos de Carne, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. E-mail: acosta@agro.uba.ar.

Carina Rosa Alvarez. Ingeniera Agrónoma (FAUBA), Magister Scientiae en Ciencia del Suelo (EPG-FAUBA), Doctora en Ciencias Agropecuarias (EPG-FAUBA). Profesora Asociada, Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. E-mail: alvarezc@agro.uba.ar.

Christian Marcelo Krisaj: Ingeniero Agrónomo (FAUBA). Especialista en Cultivos Intensivos (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral). Jefe de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Horticultura, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. E-mail: krisajch@agro.uba.ar.

Claudia Mabel Sainato. Licenciada en Ciencias Físicas (FCEN-UBA). Doctora en Ciencias Físicas (FCEN-UBA). Profesora Titular Plenaria de la Cátedra de Física, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. E-mail: csainato@agro.uba.ar

Damián Vega. Ingeniero Agrónomo (FAUBA), Magister en Producción Vegetal (EPG-FAUBA), Doctor en Agroecología (UdeA-Colombia). Jefe de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Fitopatología, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. E-mail: dvega@agro.uba.ar.

Eduardo Mario Musacchio. Ingeniero Agrónomo (FAUBA). Ayudante de primera. Cátedra de Genética, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. E-mail: musacchio@agro.uba.ar.

Esteban Daniel Borodowski. Ingeniero Agrónomo (FAUBA) y Especialista en Gestión Ambiental (UNSAM). Profesor Adjunto de la Cátedra de Dasonomía, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. A cargo de la Dirección de Producción Forestal del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Nación. E-mail: borodows@agro.uba.ar

Filipe Behrends Kraemer. Ingeniero Agrónomo (FAUBA), Doctor en Ciencias Agropecuarias (EPG-UBA), Magister en Ciencias del Suelo (EPG-FAUBA), Posdoctorado (INTA-Suelos). Profesor adjunto de la Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. Investigador adjunto (CONICET). E-mail: filipebk@agro.uba.ar

Francisco José Pescio. Ingeniero Agrónomo (FAUBA), Maestría en Desarrollo Rural (EPG-UBA), Especialista en Desarrollo Rural (EPG-UBA). Profesor adjunto de la Cátedra de Economía Agraria, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. Coordinador de Extensión y Desarrollo Territorial, EEA AMBA, INTA. E-mail: fjpescio@agro.uba.ar

Helena Rimski-Korsacov. Ingeniera Agrónoma (FAUBA). Doctora en Ciencias Agropecuarias (EPG-UBA). Profesora adjunta de la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. E-mail: rimski@agro.uba.ar

- Luciana Laura Couso. Licenciada en Ciencias Biológicas (FCEN-UBA), Doctora en Ciencias Agropecuarias (EPG-UBA), Posdoctorado (Universidad de Buenos Aires). Carrera docente (FAUBA). Jefa de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Genética, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. E-mail: lcouso@agro.uba.ar.
- Marcela Harris. Ingeniera Agrónoma (FAUBA), Candidata a Doctora en Ciencias Agropecuarias (EPG-FAUBA). Jefa de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Horticultura, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. E-mail: mharris@agro.uba.ar
- María del Pilar Muschietti Piana. Lic. en Economía y Administración Agrarias (FAUBA). Magister Scientiae en Ciencias del Suelo (EPG-UBA). PhD in Agriculture and Natural Resources Sciences (University of Adelaide). E mail: muschiet@agro.uba.ar.
- Norma Beatriz Gorosito. Ingeniera Agrónoma (FAUBA), Doctora en Ciencias Básicas y Aplicadas (UNQ), Profesora adjunta de la Cátedra de Zoología Agrícola, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. Profesora Asociada, Laboratorio de Entomología Aplicada y Forense, Dpto. de Ciencia y Tecnología (UNQ). E-mail: ngorosito@agro.uba.ar.
- Patricia Beatriz Lombardo. Ingeniera Agrónoma (Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP) y Doctora de la Universidad de Buenos Aires, con mención en el Área de Educación. Profesora Titular de la Cátedra de Economía Agraria, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. E-mail: patricia@agro.uba.ar.
- Patricia Lilia Fernández. Ingeniera Agrónoma (FAUBA), Doctora en Ciencias Agropecuarias (EPG-UBA), Posdoctorado (Universidad de Leeds, Reino Unido). Profesora adjunta de la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. Investigadora asistente (CONICET). E-mail: fpl@agro.uba.ar.
- Raúl Silvio Lavado. Ingeniero Agrónomo (FAUBA). Profesor Titular Consulto Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. Investigador Superior (*ad honorem*) (CONICET). E-mail: lavado@agro.uba.ar.
- Susana Urricariet. Ingeniera Agrónoma (UBA), Magister Scientiae en Ciencia del suelo (EPG-UBA). Profesora adjunta jubilada. E-mail: urricari@agro.uba.ar.
- Tomás Della Chiesa. Ingeniero Agrónomo (FAUBA), Doctor en Ciencias Agropecuarias (EPG-UBA), Posdoctorado (Iowa State University, Estados Unidos). Jefe de trabajos prácticos de la Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas, Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. E-mail: tomasdc@agro.uba.ar.

Índice

Presentación del libro	III
Autoras y autores	VII
Capítulo 1 - Conceptos básicos y características de los agroecosistemas <i>Patricia L. Fernández</i>	1
Capítulo 2 - Teoría de sistemas para el estudio de agroecosistemas <i>Patricia L. Fernández</i>	29
Capítulo 3 - Sistemas de producción agrícola <i>Patricia L. Fernández</i>	43
Capítulo 4 - Sistemas de producción ganadera Producción de carne bovina <i>Alejandra Acosta</i>	61
Capítulo 5 - Sistemas de producción ganadera. Producción de leche bovina <i>Alejandra Acosta</i>	78
Capítulo 6 - Sistemas forestales <i>Esteban D. Borodowski</i>	87
Capítulo 7 - Sistemas de producción hortícola <i>Marcela Harris y Christian Krizaj</i>	122
Capítulo 8 - Sistemas de producción frutícolas <i>Georgina Paula García Inza</i>	143
Capítulo 9 - Sistemas de producción orgánicos en la Argentina <i>Helena Rimski-Korsakov, Carina Rosa Álvarez</i> <i>y Patricia Lilia Fernández</i>	168
Capítulo 10 - Evolución del cambio tecnológico en la región pampeana <i>Patricia Lombardo</i>	179
Capítulo 11 - El sistema agroalimentario argentino: principales características y transformaciones <i>Patricia Lombardo</i>	201

Capítulo 12 - Agricultura post-industrial. El modelo agrario en discusión <i>Francisco Pescio</i>	211
Capítulo 13 - La soberanía alimentaria y la agroecología; caminos, ¿hacia dónde? <i>Francisco Pescio</i>	230
Capítulo 14 - Deterioro de los recursos naturales. Degradación y calidad de suelos <i>Patricia Lilia Fernández y Filipe Behrends Kraemer</i>	255
Capítulo 15 - La semilla como base de los agroecosistemas <i>Eduardo Musacchio y Luciana L. Couso</i>	287
Capítulo 16 - Uso de fertilizantes y abonos en agroecosistemas <i>Helena Rimski-Korsakov y Raúl Silvio Lavado</i>	308
Capítulo 17 - Manejo de adversidades biológicas de los cultivos <i>Damián Vega y Norma Gorosito</i>	337
Capítulo 18 - Efectos de la actividad antrópica en el suelo <i>Patricia Lilia Fernández y Filipe Behrends Kraemer</i>	358
Capítulo 19 - Efectos de la actividad antrópica en aguas <i>Patricia L. Fernández y Susana Urricariet</i>	397
Capítulo 20 - Efectos de la actividad antrópica agropecuaria sobre la atmósfera <i>Patricia L. Fernández y Tomás Della Chiesa</i>	418
Capítulo 21 - Tecnologías aplicadas a la contaminación de suelos y aguas <i>Claudia M. Sainato</i>	450
Capítulo 22 - Agricultura de precisión <i>María del Pilar Muschietti Piana y Susana Urricariet</i>	465
Capítulo 23 - Ciclado de nutrientes en agroecosistemas <i>M. del Pilar Muschietti Piana y Patricia L. Fernández</i>	490
Capítulo 24 - Cultivos hortícolas: ¿cómo es la producción? <i>Marcela Harris y Christina Krizaj</i>	508

20.1. Atmósfera terrestre: conceptos básicos

20.1.1. Estructura de la atmósfera

La atmósfera que rodea a la tierra es una capa gaseosa envolvente formada principalmente por gases, pero también por elementos sólidos y líquidos en suspensión. Esta capa ocupa el espacio desde la superficie terrestre y su límite superior es difícil de definir, aunque se suele ubicar cerca de los 600 km de altura. El 90% de su volumen se encuentra en los primeros 20 km de altura y el 10% del volumen restante se distribuye con una densidad decreciente con la altura. La atmósfera se encuentra dividida en cuatro estratos: (i) tropósfera, (ii) estratósfera, (iii) mesósfera, (iv) termósfera o ionósfera y (v) exósfera (*Figura 20.1a*). Cada uno de ellos posee diferentes características de densidad, temperatura y energía de radiación solar incidente.

- (i) Tropósfera: tiene un espesor promedio de 11 km. Es la capa más densa y posee casi todo el vapor de agua y aerosoles de la atmósfera. Es de elevada importancia dado que allí es donde se desarrollan los procesos de vida. La temperatura disminuye 0,65 °C cada 100 m de altura. La composición es bastante uniforme debido al constante mezclado por la circulación de las masas de aire. Sin embargo, el contenido de vapor de agua es variable debido a la evaporación de agua desde los océanos, la formación de nubes y las precipitaciones. En la tropósfera ocurren los fenómenos meteorológicos.
- (ii) Estratósfera: se extiende hasta una altura de 50 km. Esta capa presenta un gradiente térmico inverso a la anterior, es decir, la temperatura aumenta 10-20 °C cada 60 km de altura. Esto se debe a la absorción de radiación UV, debido a la mayor concentración de ozono atmosférico que posee esta capa (*Figura 20.1b*). Por la ausencia de movimientos convectivos de aire hay estratificación vertical. Los contaminantes que allí se inyectan se mueven horizontalmente sin mezclas verticales y, por lo tanto, circulan en esta capa, pero no son dispersados ni removidos de la misma salvo que ocurran reacciones químicas.
- (iii) Mesósfera: se encuentra entre los 50 a los 80 km de altura. La temperatura de esta capa disminuye con la altura consecuencia de la disminución de la concentración de ozono. Esto se debe a que la concentración de compuestos o especies químicas es muy baja y en consecuencia la absorción de la radiación recibida por la Tierra es débil en capas superiores.
- (iv) Termósfera o ionósfera: La temperatura aumenta con la altura a causa de la absorción de radiación UV. En esta capa, debido a la incidencia de rayos X y UV (radiación solar), se origina una gran ionización de especies.

Más allá de la termósfera se encuentra la exósfera que es una capa muy tenue compuesta por partículas ionizadas de oxígeno (O₂), hidrógeno y helio, pero su densidad es tan baja que dejan de cumplirse las leyes de los gases. Por otro lado, cabe mencionar que entre los cuatro estratos de la atmósfera se encuentran capas intermedias que son de menor espesor, pero con algunas características particu-



lares: la tropopausa, estratopausa y mesopausa. Como se puede observar, el gradiente de temperatura que presenta cada capa es diferente. El movimiento de las capas atmosféricas se origina debido al calentamiento del aire cerca de la superficie de la tierra, el cual cambia su densidad y asciende mientras su temperatura sea superior a las capas que atraviesa.

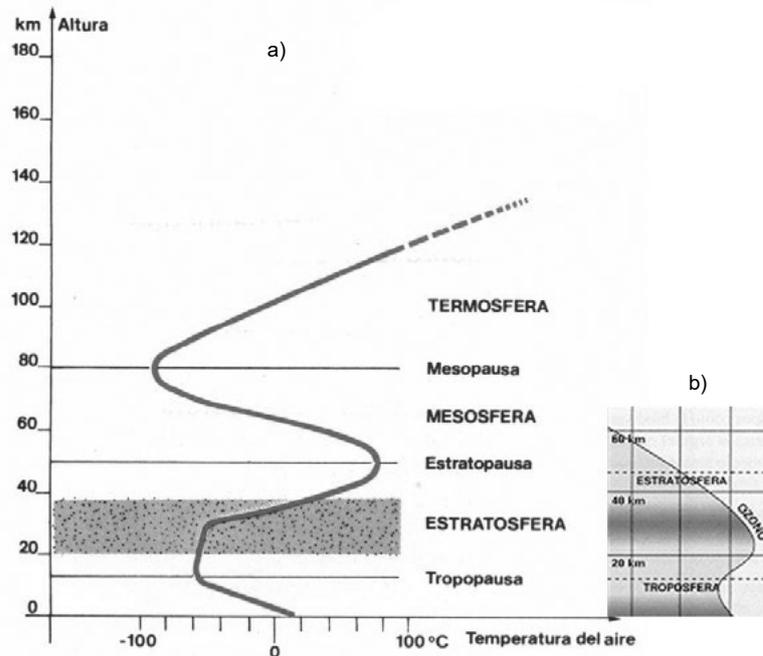


Figura 20.1.(a) Cambios de la temperatura con la altura en las capas de la atmósfera. La banda gris del gráfico indica la mayor concentración de ozono de la atmósfera. **(b)** Concentración de ozono en la estratosfera. Adaptado de Orozco Barrenetxea et al. (2008).

20.1.2. Composición de la atmósfera

En la atmósfera se pueden encontrar tres tipos de componentes: gases, líquidos y aerosoles.

Gases: hasta aproximadamente los 100 km de altura la composición de la atmósfera es bastante constante. Es a partir de allí que comienzan a aparecer variaciones debido a las radiaciones, solar y cósmica, y al campo gravitacional de la Tierra. En el **Cuadro 20.1** se presenta la composición química del aire en las proximidades de la superficie terrestre.

Los gases pueden ser evaluados desde el punto de vista del tiempo de permanencia en la atmósfera, es decir, la vida media de las moléculas de un gas. El tiempo de permanencia o vida media se obtiene de la relación entre la masa total de un gas en la atmósfera y la tasa total de remoción de ese gas de la atmósfera, por lo tanto, indica la cantidad de años, en promedio, en que una molécula del gas está presente en la atmósfera. Derivado de esto, se los clasifica de la siguiente manera: (i) gases permanentes (tiempo > 1.000 años), (ii) gases variables (entre 1 a 100 años) y (iii) gases muy variables (< 1 año). A medida que disminuye la vida media, las variaciones en la concentración aumentan en el espacio y en el tiempo.

Cuadro 20.1. Composición química del aire en las proximidades de la superficie terrestre. Extraído de Orozco Barrenetxea et al. (2008) y de IPCC (2014).

Gases	Fórmula	% en volumen	Vida media
Permanentes			
Nitrógeno	N ₂	78,08	10 ⁶ años
Oxígeno	O ₂	20,95	5.10 ³ años
Argón	Ar	0,93	-
Helio	He	0,00052	10 ⁷ años
Neón	Ne	0,00018	-
Krypton	Kr	0,0001	-
Xenón	Xe	0,000008	-
Variables			
Dióxido de carbono	CO ₂	0,03	5-200 años*
Metano	CH ₄	0,00015	12 años
Hidrógeno	H ₂	0,00005	7 años
Oxido nitroso	N ₂ O	0,00002	121 años
Ozono	O ₃	0,000002	2 años
Muy variables			
Agua	H ₂ O	0-5	10 días
Monóxido de carbono	CO	0,00001	½ años
Amoníaco	NH ₃	0,000006	7 días
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	0,0000001	6 días
Dióxido de azufre	SO ₂	0,00000002	3 días
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	0,00000002	2 días

* La vida media del CO₂ es muy difícil de calcular debido a la diversidad de tasas de remoción que presentan los distintos sumideros, o procesos de remoción.

Líquidos: el único componente líquido de importancia es el vapor de agua. Su presencia en la atmósfera es muy variable; ocupa entre 0% y 5% del volumen de la atmósfera. Esta variación resulta de suma importancia como factor de control de numerosos procesos físicos/meteorológicos y del flujo de energía que ocurren en la atmósfera.

Aerosoles: son partículas sólidas en suspensión y provienen de procesos físicos-químicos naturales de diferente origen. Estos pueden ser: polvo, polen, cenizas de erupciones volcánicas, sales de origen marino, partículas generadas en los incendios forestales naturales, entre otros.

20.1.3. La capa de ozono

Dentro de la estratosfera se encuentra la capa de ozono que representa la zona de mayor concentración de este gas en la atmósfera. El ozono estratosférico se encuentra principalmente entre los 15 y 50 km de altitud, pero su mayor concentración se da a los 25 km. El ozono absorbe radiaciones de longitudes de onda entre 240 y 300 nm. Las reacciones que suceden, por la presencia de oxígeno



atómico y molecular en la mesósfera y estratósfera, originan un ciclo y es consecuencia de oxígeno atómico y molecular en la mesósfera y estratósfera. En este ciclo interviene una especie (M) que se puede corresponder con cualquier gas componente de la atmósfera.



Donde (ii) y (iii) permiten un equilibrio de concentración de ozono para que permanezca constante y M es una especie que se puede corresponder con cualquier gas componente de la atmósfera. Este ciclo del ozono es el responsable de la temperatura máxima de la estratósfera, al ser (ii) y (iv) reacciones exotérmicas.

La capa de ozono tiene la capacidad particular de absorber gran parte de la radiación solar UV. Esta radiación es extremadamente peligrosa para los seres vivos por su capacidad mutagénica, es decir, de provocar mutaciones en el ADN. Es por ello que hasta la formación de la capa de ozono (hace 500-600 millones de años), el desarrollo de la vida fue posible únicamente bajo el agua. A partir de entonces, los seres vivos empezaron a ocupar la superficie continental.

Parte del ozono también se encuentra por debajo de los 15 km de altitud hasta la superficie de la tierra. El ozono, denominado troposférico, es perjudicial para la salud humana y forma el “smog” fotoquímico. A diferencia del ozono estratosférico que se forma por reacción del O_2 con la radiación UV, el ozono troposférico se forma a partir del dióxido de nitrógeno (NO_2) y compuestos orgánicos volátiles que reaccionan con radiación solar de menos energía. Por lo tanto, un aumento en las emisiones de NO_2 o compuestos orgánicos volátiles estimularía la formación de ozono troposférico con efectos negativos sobre la salud.

20.1.4. Balances de radiación y energía

La energía presente en la superficie terrestre resulta del balance entre los flujos de entrada y de salida del sistema, lo que llamamos balance de radiación. Todos los cuerpos emiten radiación; los que intervienen en este balance de radiación, además de la superficie terrestre son el sol y la atmósfera. En este balance, la radiación solar que llega a la superficie terrestre, luego de que una parte es absorbida por la atmósfera y otra, reflejada por la atmósfera, es la radiación global (*Figura 20.2*). Parte de la radiación global es reflejada (no absorbida) por la superficie como energía de onda corta, lo que llamamos albedo de superficie. La energía de onda larga que emite la superficie terrestre es la radiación terrestre. La atmósfera, a su vez, emite energía en todas las direcciones; la fracción de ella que llega a la superficie terrestre es la contra radiación atmosférica (*Figura 20.2*). Es muy importante comprender que la contra radiación atmosférica aporta más energía a la superficie que la radiación global proveniente del sol.

La *Figura 20.2* muestra el balance de energía con valores promedio anuales y globales. La figura muestra además un sistema en equilibrio ya que el balance de energía en el tope de la atmósfera es



cero ($\text{Radiación neta}_{\text{tope de la atmósfera}} = 342 - 235 - 107 = 0 \text{ W m}^{-2}$). Sin embargo, el balance de radiación de la superficie terrestre es positivo ($\text{RN}_{\text{superficie terrestre}} = 198 + 324 - 30 - 390 = 102 \text{ W m}^{-2}$). Esto significa que la superficie de la tierra no está en equilibrio según los flujos de radiación. La energía disponible entonces sale del sistema “superficie terrestre” por flujos no radiativos: la transferencia de calor a la atmósfera (o flujo de calor sensible), la evaporación del agua (o flujo de calor latente) y la transferencia de energía al suelo subsuperficial (no representado en la **Figura 20.2**). Con estas pérdidas de energía, que constituyen el balance de energía de la superficie terrestre, el sistema también está en equilibrio.

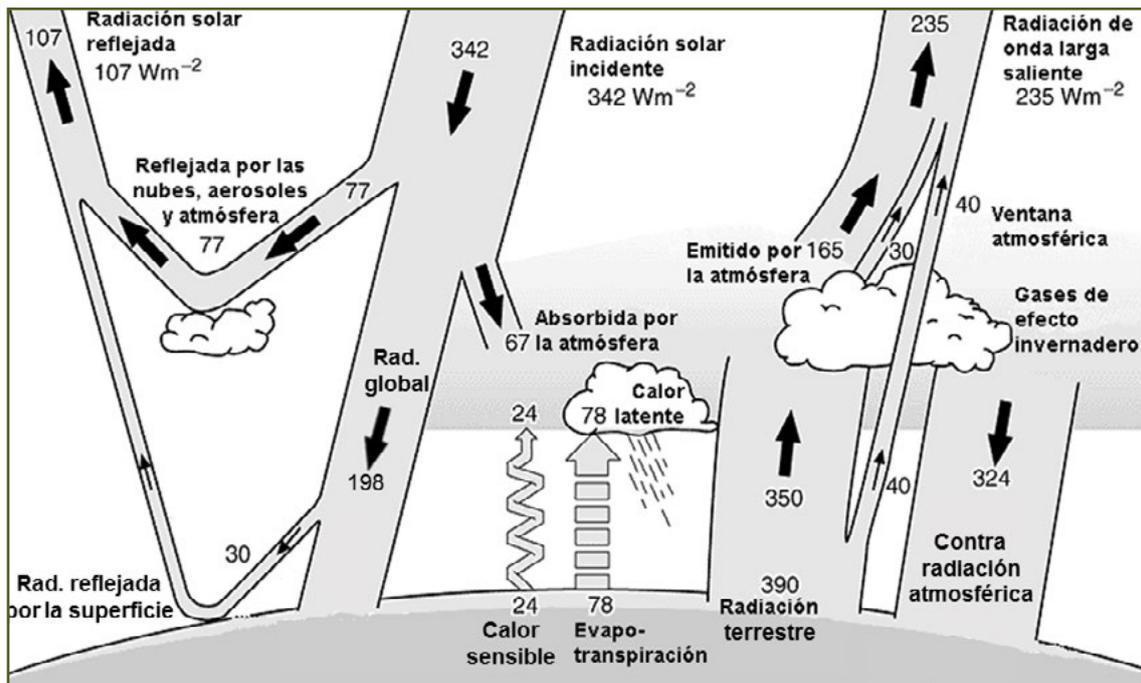


Figura 20.2. Esquema del balance de energía anual global del planeta Tierra. Los números indican los flujos de energía están expresados en W m^{-2} . Las bandas grises con flechas negras corresponden a los flujos de energía radiativos mientras que los flujos de calor latente y sensible se muestran con flecha punteada y quebrada, respectivamente. Rad.= radiación.

El efecto invernadero natural es el proceso por el cual ciertos gases que constituyen la atmósfera absorben la radiación de onda larga y reemiten energía en todas las direcciones de modo que una parte llega y es absorbida por la superficie terrestre como energía de onda larga (**Figura 20.2**). La cantidad de energía que recibe en promedio la superficie terrestre emitida por la atmósfera es mayor que la que recibe proveniente del sol ($324 \text{ vs } 198 \text{ W m}^{-2}$). Los gases de la atmósfera que intervienen en este proceso son llamados gases de efecto invernadero (GEI). Entre ellos, los que más contribuyen al efecto invernadero son el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). Estos gases tienen principalmente un origen natural, es decir, que son emitidos a la atmósfera por procesos que ocurren en la naturaleza. La presencia de estos gases en la atmósfera y su resultante efecto invernadero fueron indispensables para el desarrollo de la vida ya que permitieron que la temperatura media de la superficie de la tierra sea de aproximadamente 15°C . Sin el efecto invernadero, la temperatura sería de aproximadamente -18°C .

La intensidad del efecto invernadero depende principalmente de la concentración en la atmósfera de los gases que lo producen. Por lo tanto, a pesar de representar una fracción casi despreciable del volumen de la atmósfera, pequeños cambios en la concentración tienen efectos importantes en el sistema

climático. En un sistema en equilibrio, la tasa de emisión de GEI sería igual a la tasa de destrucción o remoción de los gases. Si, en cambio, la tasa de emisión aumenta respecto a la de remoción, o aparecen fuentes nuevas de los GEI, la concentración en la atmósfera aumenta y el efecto invernadero se intensifica. El efecto invernadero antropogénico es, por lo tanto, la intensificación del efecto invernadero natural debido a un aumento en la concentración de GEI en la atmósfera derivado de la actividad humana. El aumento de la concentración de GEI puede deberse a una mayor emisión o una menor absorción de los GEI (como ocurre con el CO_2 , N_2O y el CH_4), o a la producción y emisión de gases sintéticos (que no se producen en la naturaleza) como son los compuestos clorofluorocarbonados o hexafluoruro de azufre- SF_6 .

20.2. Cuatro problemas en la relación uso del suelo-atmósfera

La atmósfera está estrechamente conectada con la biósfera y el suelo a través de flujos muy activos de materia y energía. El uso y manejo del suelo y la vegetación conllevan cambios en la emisión y remoción de gases y partículas, que cambian la composición de la atmósfera, como así también cambios en las características de la superficie que alteran la capacidad de absorber y reflejar energía. Estos cambios ocurren particularmente en sistemas bajo agricultura, ganadería o producción forestal. A continuación, se discutirán cuatro problemas en la relación uso del suelo-atmósfera con implicancias negativas en el ambiente, el sistema climático y la salud humana. Ellos son: (i) el calentamiento global, (ii) la destrucción del ozono estratosférico, (iii) la contaminación atmosférica y (iv) cambios en el balance de energía superficial.

20.2.1. Calentamiento global

20.2.1.1. Estado de situación mundial en la emisión de GEI

Los cambios en la concentración de los GEI y de los aerosoles alteran el balance de energía del sistema climático y afectan la absorción y la emisión de las radiaciones de la atmósfera y de la superficie terrestre. Las actividades humanas generan emisiones de GEI de permanencia variable en la atmósfera: el CO_2 , el CH_4 , el N_2O y los halogenuros y CFC. Estos gases difieren en su efectividad en atrapar calor y en su tasa de ciclado en la atmósfera. Para un lapso de tiempo de 100 años y una unidad de masa el CH_4 y N_2O poseen un poder de calentamiento global 25 y 298 veces mayor, respectivamente, que una unidad de masa de CO_2 (IPCC, 2007).

Las concentraciones de GEI en la atmósfera aumentan cuando las emisiones son superiores en magnitud a los procesos de detracción. Las concentraciones de CO_2 , CH_4 y N_2O en la atmósfera mundial han aumentado considerablemente por efecto de las actividades humanas desde 1750, y en la actualidad exceden en mucho los valores pre-industriales determinados mediante el análisis de núcleos de hielo acumulados durante miles de años. Las emisiones mundiales de GEI entre 1970 y 2004 aumentaron en un 70%. En la *Figura 20.3* se presentan las cantidades de CO_2 , CH_4 , y N_2O emitidas principalmente por el consumo de combustible y por la agricultura. El CH_4 y el N_2O se expresan en CO_2 equivalente debido a que los gases de efecto invernadero tienen diferente forzamiento radiativo, y el CO_2 es el que ha tenido, y de acuerdo con las proyecciones tendrá, un mayor efecto sobre el for-



zamiento. El forzamiento radiativo es una medida del cambio en el balance de radiación del sistema climático por lo tanto se expresa en $W m^{-2}$. Un forzamiento radiativo positivo significa un aumento en la cantidad de energía del sistema y, por lo tanto, un calentamiento. Esta medida permite comparar el efecto sobre la temperatura global del aumento de los diferentes GEI en la atmósfera, como así también de otros procesos biofísicos que afecten el balance de radiación. Para el caso de los GEI, el forzamiento radiativo depende de la eficiencia radiativa del gas y de su concentración en la atmósfera. De esta forma, el aumento en la concentración de CO_2 en la atmósfera desde la era pre-industrial hasta hoy es responsable del 66% del aumento de temperatura global, el CH_4 del 17% y el N_2O del 6% (Figura 20.3).

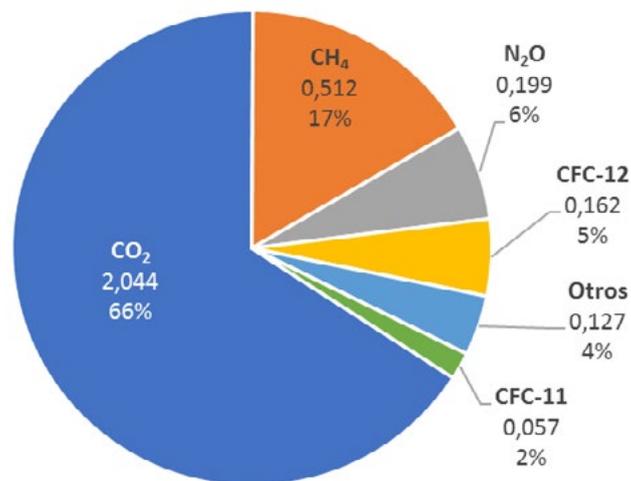


Figura 20.3. Aumento del forzamiento radiativo desde la era pre-industrial hasta el año 2018 de los principales GEI (CO_2 , CH_4 , N_2O y CFC) expresado en $W m^{-2}$ y en porcentaje relativo al aumento total de todos los GEI ($3,1 W m^{-2}$). Extraído de WMO, (2019).

Los aumentos de la concentración mundial de CO_2 se deben principalmente a la utilización de combustibles de origen fósil y, en una parte apreciable pero menor, a los cambios en el uso de la tierra. La concentración de CO_2 en la atmósfera mundial aumentó pasando de un valor pre-industrial de aproximadamente 280 ppm¹ a 408 ppm en 2018 (OMM, 2019). La tasa de crecimiento de las concentraciones de CO_2 (período 2008-2018) se correspondieron con 2,26 ppm año⁻¹ (Baird y Cann, 2008). Por otro lado, la concentración de CH_4 en la atmósfera mundial ha aumentado, respecto del valor pre-industrial de aproximadamente 715 ppb² hasta 1732 ppb a comienzos de los años 90, alcanzando en 2018 las 1869 ppb (OMM, 2019). Es muy probable que el aumento observado en la concentración de CH_4 se deba principalmente a la actividad agropecuaria y a la utilización de combustibles de origen fósil. Finalmente, el N_2O proviene principalmente de la agricultura. La concentración mundial de este gas en la atmósfera aumentó de 270 ppb (preindustrial) a 331 ppb en 2018. La concentración de numerosos halogenuros y CFC ha aumentado respecto de unos niveles casi nulos en la era pre-industrial, debido principalmente a la actividad humana asociada a procesos de refrigeración y aislamiento térmica. A pesar de presentar una concentración realmente baja en la atmósfera (del orden de los 200-300 ppb) aportan el 11% del efecto invernadero antropogénico.

20.2.1.2. Emisiones de GEI desde los agroecosistemas

Entre el 40 y 50% de la superficie terrestre se encuentra destinada a agricultura (Smith *et al.* 2007). La roturación de los suelos, la disminución de la cobertura vegetal y el escaso retorno de restos vegetales propios de los suelos agrícolas ha provocado la disminución del carbono orgánico (CO) en esos suelos (Lal 2004). Las emisiones de GEI provenientes de la agricultura representan entre el 10 y 12% de las emisiones totales a nivel mundial. Dentro de las actividades agrícolas, las principales fuentes de emisiones son: (i) el N_2O desde los suelos, directamente relacionado con la cantidad de fertilizantes nitrogenados incorporados al suelo y de la descomposición de residuos del cultivo antecesor, (ii) N_2O y CH_4 de la quema de biomasa, (iii) CH_4 por producción de arroz (*Oryza sativa* L.), (iv) N_2O y CH_4 por manejo de residuos, y (v) , las emisiones de CO_2 y N_2O a partir de la mineralización de la materia orgánica (MO) del suelo en caso de suelos con cambios de uso recientes.

Las actividades productivas agropecuarias, silvícolas y otros usos de la tierra en la Argentina para el 2016 fueron responsables de la emisión del 37% del CO_2 equivalente de un total de 364 Mt (136 Mt CO_2 equivalente) (<https://inventariogei.ambiente.gob.ar>, 2019). De los 136 Mt CO_2 equivalente, el 23% tuvo origen en la actividad agrícola y en el cambio del uso de la tierra, el 36% proviene de fuentes agregadas y emisiones no- CO_2 , y el 41% fue emitido desde el ganado (**Figura 20.4**).

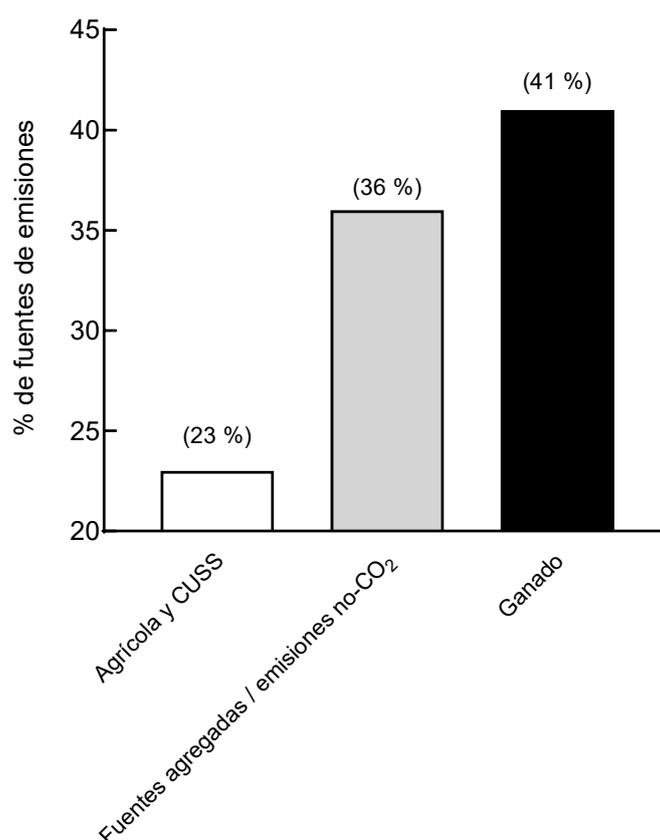


Figura 20.4. Porcentaje (%) de emisiones desde la actividad agropecuaria y cambios en el uso de las tierras (CUSS), calculado a partir del CO_2 equivalente, en Argentina: convertidas a pastizales y convertidas en cultivo, fuentes agregadas y emisiones no- CO_2 : emisiones de N_2O (gestión de estiércol, desde MO, etc.), cultivos de arroz, aplicación de urea, quema de tierras forestales, cultivos, pastizales; ganado: producto de la fermentación entérica y gestión de estiércol. Fuente: <https://inventariogei.ambiente.gob.ar> (2019).

De acuerdo con las directrices para Inventarios Nacionales de IPCC (2006), la dinámica de los GEI generados a partir de la actividad agropecuaria incluyen los siguientes:

- (i) Las emisiones y absorciones de CO_2 resultantes de los cambios en las existencias de carbono en la biomasa, MO muerta y suelos minerales, para todas las tierras gestionadas.
- (ii) Emisiones de gases CO_2 y no- CO_2 producidas por incendios. Los incendios no sólo emiten CO_2 a la atmósfera mediante la combustión de la biomasa, sino también otros GEI incluyendo directa o indirectamente a CH_4 , N_2O , COVNM, NO_x y CO. La quema de rastrojos es una práctica que se realiza para facilitar las posteriores labores agrícolas, y tiene por finalidad que no existan residuos en descomposición del cultivo anterior durante el crecimiento del cultivo siguiente. Es una práctica frecuente en el Noroeste (NOA) y Noreste (NEA) de Argentina. Sin embargo, esta categoría no forma parte de las fuentes clave de emisión del país. La caña de azúcar es el principal cultivo que contribuye a esta fuente, lo cual depende de la producción del cultivo y la cantidad de rastrojo quemado.
- (iii) Emisiones de N_2O de tierras con manejo agrícola. El incremento en la cantidad de N en los suelos como producto de la aplicación de fertilizantes sintéticos y/o estiércol u orina animal, produce el aumento de las emisiones de N_2O , el cual es un subproducto de las reacciones de nitrificación (pasaje de amonio a nitratos) y, mayormente, de desnitrificación (pasaje de nitratos a nitrógeno atmosférico). Del mismo modo, los cambios de uso de la tierra realzan las emisiones de N_2O si están asociados con una elevada descomposición de la MO del suelo, y con la subsiguiente mineralización del su N orgánico, como sucede cuando se inician cultivos en humedales, bosques y pastizales.
- (iv) Emisiones de CO_2 relacionadas con la aplicación de cal y urea. El encalado que se emplea para reducir la acidez de los suelos y mejorar la productividad de las plantas, libera C a la atmósfera cuando se elimina el carbonato de calcio de los depósitos de piedra caliza y dolomita, y se aplica a los suelos donde el ion carbonato evoluciona a CO_2 . Del mismo modo, la aplicación de fertilizante nitrogenado en forma de urea $-\text{CO}(\text{NH}_2)_2-$ produce liberación de CO_2 a la atmósfera.
- (v) Emisiones de CH_4 del cultivo de arroz. En condiciones de inundación, como en los humedales o en los sistemas de producción de arroz con manto de inundación, hay una fracción significativa de la MO que se encuentra en descomposición. Esta descomposición libera CH_4 a la atmósfera y puede constituir una fuente importante de emisiones de GEI en aquellos países que destinan una importante superficie a la producción de arroz inundado. En la Argentina el arroz se cultiva en áreas de llanura con climas que van de templado a subtropical húmedo. La descomposición anaeróbica de la MO en los arrozales anegados produce emisiones de CH_4 a la atmósfera. Sin embargo, este cultivo no constituye una de las principales categorías de fuentes de emisión de CH_4 para la Argentina. Existen otras fuentes de emisión, que revisten menor o ninguna importancia en la Argentina:
- (vi) Emisiones de CO_2 y N_2O de suelos orgánicos o histosoles. Se trata los GEI emitidos por el cultivo de suelos orgánicos (i.e. turberas), los que en nuestro país ocupan escasa superficie y no son destinados a la agricultura.
- (vii) Emisiones de CO_2 y N_2O de humedales cultivados. Se trata de tierras cubiertas por agua gran parte del año, las cuales son drenadas artificialmente y destinadas a la agricultura. No constituye una práctica frecuente en nuestro país.

- (viii) Emisión de CH_4 y N_2O producidos por el manejo de estiércol. A diferencia de otros países, como muchos de Europa y Asia, en la Argentina el uso de abonos orgánicos no es frecuente en cultivos extensivos. Sin embargo, esta práctica es usual en cultivos intensivos, pero estos ocupan escasa superficie.

2.1.2.1 Dióxido de carbono

El uso de combustible fósil es considerado el principal responsable de más del 75% de las causas antrópicas de emisión de CO_2 . Los cambios del uso de la tierra emiten casi un cuarto del CO_2 de origen humano, principalmente debido a la deforestación (Snyder *et al.*, 2009). La deforestación para la realización de cultivos anuales conduce a un incremento de CO_2 en la atmósfera, debido a la descomposición o quema de los árboles que se retiran y a la menor capacidad de los cultivos anuales de captación de CO_2 por fotosíntesis y su posterior incorporación al suelo.

Además, en los agroecosistemas pueden existir pérdidas directamente desde los suelos y esto depende del manejo que se realiza dentro del sistema. En los agroecosistemas el proceso responsable de tomar y metabolizar el CO_2 de la atmósfera es la fotosíntesis de las plantas. Mediante este proceso, y luego de la muerte o senescencia de la planta, parte del C de las estructuras, mediante el proceso de humificación, pasa a formar parte del componente orgánico del suelo, denominándolo carbono orgánico (CO). El proceso opuesto a la humificación es la respiración microbiana, siendo el principal producto el CO_2 . La respiración microbiana es una vía de salida del CO del suelo que se produce por el consumo de la MO del suelo. Este proceso se denomina mineralización.

Efecto de la deforestación sobre la emisión de CO_2 . La deforestación se ha acelerado en las últimas décadas como resultado de la expansión de la agricultura, y representa una gran fuente de GEI, ocupando el segundo lugar luego de los combustibles fósiles (Baird y Cann, 2008). La intensa y acelerada pérdida de bosques nativos que se registra a escala mundial constituye uno de los problemas ambientales más críticos a comienzos del siglo XXI (Repetto, 1988; Hunter, 1996). Mientras que en los países desarrollados el área ocupada por plantaciones forestales se ha estabilizado y, en algunos casos, se está incrementando (Hulshoff, 1995; Marchetti *et al.*, 1998), en los países en desarrollo las masas boscosas están declinando rápidamente, particularmente en los trópicos (Repetto, 1988). Estas pérdidas alcanzan tasas anuales del 0,6% en África, 0,9% en Asia y 0,7% en Sudamérica. Este proceso se debe particularmente al cambio en el uso de la tierra, es decir, a la expansión de la agricultura (Stiling, 1996).

Además, la deforestación es una de las principales causas de la extinción de especies (Sala *et al.*, 2000; Foley *et al.*, 2005), de la emisión de CO_2 (Houghton, 2003) y del cambio climático a escala regional y global (Pielke *et al.*, 2002). No sólo produce una reducción del área boscosa, sino también cambios en la configuración del paisaje (Skoley Tucker, 1993), afectando la condición ecológica del bosque remanente con consecuencias sobre los flujos de las especies, de la energía y de la materia.

Los aumentos de la producción de granos en la Argentina estuvieron marcados por una expansión sobre nuevas tierras (Viglizzo *et al.*, 2010a; b). Los cambios más significativos en el uso de la tierra se presentaron en el norte de la Argentina, donde las tasas de expansión de cultivos y de deforestación fueron las más altas del país. La superficie de bosques naturales tuvo una reducción significativa (Viglizzo *et al.*, 2010a; b). Gómez Lende (2018) señala que, según el Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos, en 1998 el área boscosa había caído a 33.190.442 ha, reduciéndose un 5,66% respecto

de 1987 (SAyDS, 2005), lo cual significa que en 11 años desapareció una proporción ligeramente inferior a la pérdida sufrida a lo largo del medio siglo transcurrido entre 1937 y 1987. Las actualizaciones cartográficas posteriores mostraron que la superficie boscosa disminuyó a 30.073.386 ha en 2002 y 26.590.000 ha en 2013 (SAyDS, 2005; MINAGRI-SAyDS, 2015). En términos generales, estos datos muestran una notable aceleración del fenómeno, dado que en poco más de un cuarto de siglo (1987-2013) el retroceso fue del 24%. Asimismo, es importante señalar que esta reducción podría ser aún mayor, dado que no existen estadísticas oficiales sobre deforestación en la región del Monte, en tanto que desde 1998 el Bosque Andino Patagónico no ha sido objeto de ningún relevamiento. Sin embargo, fuentes oficiales afirman que su superficie se habría mantenido estable.

El proyecto “Bosques Nativos y Áreas Protegidas BIRF2085-AR” es financiado por el Banco Mundial y llevado a cabo por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, derivó a partir de 2002 en la realización de una serie de Informes de Monitoreo de la Superficie de Bosque Nativo de la República Argentina destinados a cuantificar el avance de la deforestación a escala provincial y departamental. Sobre la base de estos relevamientos se estableció la superficie total deforestada (*Figura 20.5*). Entre 1998 y 2016 se deforestaron 6.906.160 ha de bosques nativos en Argentina, la mayor parte de las cuales (72,88%) fue destruida entre 1998 y 2011 (5.032.721 ha) (*Cuadro 20.2*). En este lapso de poco menos de dos décadas, el ritmo promedio de los desmontes fue de 383.675,56 ha año⁻¹. Más aun, tomados individualmente, los relevamientos 1998-2002, 2002-2006 y 2006-2011 muestran casi una duplicación de la velocidad de la deforestación en la Argentina respecto del período 1987-1998, época en la que se talaron en promedio 180.000 hectáreas al año (Schmidt, 2015). Recién entre 2013 y 2016 la deforestación comenzó a ralentizarse. Sin embargo, la situación continúa siendo preocupante: en efecto, las cifras correspondientes a la superficie desmontada durante el trienio 2014-2016 se sitúan en valores ligeramente inferiores a los del período 1987-1998, pero siempre manteniéndose por encima de las 100.000 mil ha año⁻¹. En particular, debe señalarse que no existen datos para la provincia de Entre Ríos para los períodos 1998-2002 y 2002-2006.

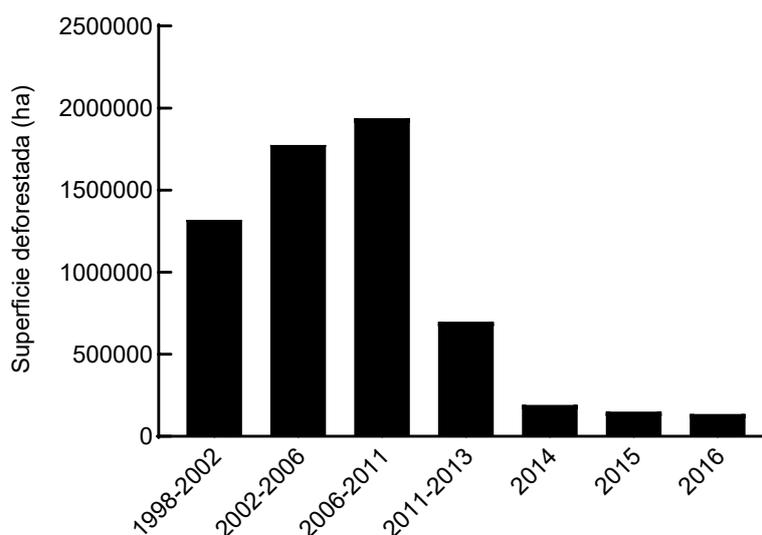


Figura 20.5. Superficie total deforestada (ha) de bosques nativos para las provincias Santiago del Estero, Salta, Chaco, Formosa, San Luis, Córdoba, Misiones, Catamarca, La Rioja, Entre Ríos, La Pampa, Tucumán, Santa Fe, Jujuy, Corrientes, San Juan. Fuente: Gomez Lende (2018)

Sobre un total de 16 provincias relevadas entre 1998 y 2016, son cinco las que representan el 78,35% de la superficie deforestada (Santiago del Estero, Salta, Chaco, Formosa y San Luis), y apenas tres dan cuenta del 65,38% (4.515.253 ha): Santiago del Estero (31,20%), Salta (23,59%) y Chaco (10,59%)-. Los casos más graves correspondieron a Salta con más de 1.000.000 ha. desmontadas, y Santiago del Estero con más de 2.000.000 ha deforestadas. El segundo en orden de gravedad correspondió al sur pampeano, gran parte de San Luis, el norte cordobés y santafesino, el este tucumano y fragmentos de Santiago del Estero, La Rioja, Formosa, Entre Ríos y Misiones, presentando la sumatoria de la superficie deforestada a lo largo del período 1998-2016 entre 25.779 y 99.999 ha desmontadas (**Cuadro 20.2**).

Cuadro 20.2. Superficie deforestada de bosques nativos (ha) en las provincias afectadas para el período 1998-2016.
Fuente: Gomez Lende (2018)

Provincia	1998/2002 (ha)	2002/6 (ha)	2006/11 (ha)	2011/13 (ha)	2014 (ha)	2015 (ha)	2016 (ha)	1998/2016 (%)
Santiago del Estero	347302	655828	701030	170297	48623	34974	26256	31.2
Salta	203560	440064	440943	213142	57396	39635	21202	23.6
Chaco	114851	156840	182441	107145	19344	15040	28756	10.6
Formosa	27562	45283	174340	92153	25476	19324	21531	7.2
San Luis	111963	92989	109877	25268	9472	10502	12358	5.8
Córdoba	161508	126937	68365	5048	2038	679	350	5.4
Misiones	82760	86772	38395	5614	1011	969	1001	3.2
Catamarca	65404	60679	21735	6873	272	664	3184	2.4
La Rioja	45384	13930	31972	17571	7298	10893	14242	2.3
Entre Ríos			94843	23166	5853	5866	2370	2.2
La Pampa	93059	11758	5806	1504	8340	5366	3890	1.9
Tucumán	25650	42762	25333	14197	1330	844	171	1.8
Santa Fe	32971	25925	21275	5397	1958	1700	539	1.4
Jujuy	7266	12925	16669	9082	1492	3143	623	0.9
Corrientes	152	2052	5286	1480	990	600	0	0.2
San Juan	92	104	79	0	0	0	0	0

Cabe destacar que las deforestaciones hasta la década del 70 tenían el objetivo de realizar cultivos anuales adaptados a cada región. Así, en la Selva Paranaense, el bosque era retraído por el cultivo de la yerba mate, en las Yungas, por el cultivo de la caña de azúcar y en las zonas húmedas del bosque Chaqueño, por el algodón. Durante los 70 se introdujo el poroto negro, también anual, y en la década del 80 fue mayormente el cultivo de soja. En cambio, en la selva Paranaense, la deforestación también fue con fines de introducir plantaciones de árboles, como el pino y el eucalipto.

La intervención de los ecosistemas para agricultura y ganadería altera la relación entre las fracciones de C de la biomasa y el C del suelo que define la sustentabilidad intrínseca del ecosistema. Esta relación es mucho mayor en bosques que en las tierras con pastizal/pastura y menor aún en las tierras agrícolas. Al existir un reemplazo creciente de bosques por pastizales/pasturas y cultivos, el stock de C en biomasa declinó. Por lo tanto, una mayor tasa de deforestación se asocia con mayores emisiones de C (Viglizzo *et al.*, 2010b; 2011).



Efecto de las labranzas sobre la emisión de CO₂ del suelo. En la primera mitad del siglo XX, la región pampeana se caracterizó por sistemas de producción agrícola-ganaderos, bajo el clásico sistema de rotación de cultivos con pasturas. Los períodos con pasturas eran útiles para mejorar la estructura del suelo y recuperar los niveles de C orgánico del suelo. De a poco estos sistemas fueron reemplazados por sistemas de producción agrícola, en los cuales las labranzas (e.g. arado de reja y vertedera) rebatían el pan de suelo, produciendo alteraciones estructurales y funcionales, pero particularmente promoviendo la pérdida de C del suelo en forma de CO₂. Con el objetivo de mitigar los procesos de erosión y de pérdidas de C desde los suelos, más tarde, se adoptó como sistema de labranza a la siembra directa.

En suelos de la pampa ondulada se midieron las emisiones totales de CO₂ o respiración total del suelo *in situ* (mineralización y descomposición) bajo distintas rotaciones trigo/soja y trigo/soja-maíz y diferentes sistemas de labranza (convencional, mínima y siembra directa). La respiración microbiana del suelo mostró una marcada estacionalidad, en relación con la temperatura, siendo máxima en verano y mínima en invierno (**Figura 20.6A**). Esta dinámica se observó independientemente del sistema de labranza. La temperatura fue el factor regulador principal de la emisión de CO₂ proveniente de la respiración microbiana del suelo (**Figura 20.6B**). En cambio, la respiración no mostró relación con el contenido hídrico (Álvarez *et al.*, 1995a, 1995b, 1996, 1998). Esto también se asoció al clima a escala regional que para determinado nivel de precipitaciones anuales determina que la temperatura sea el principal factor regulador de actividad microbiana.

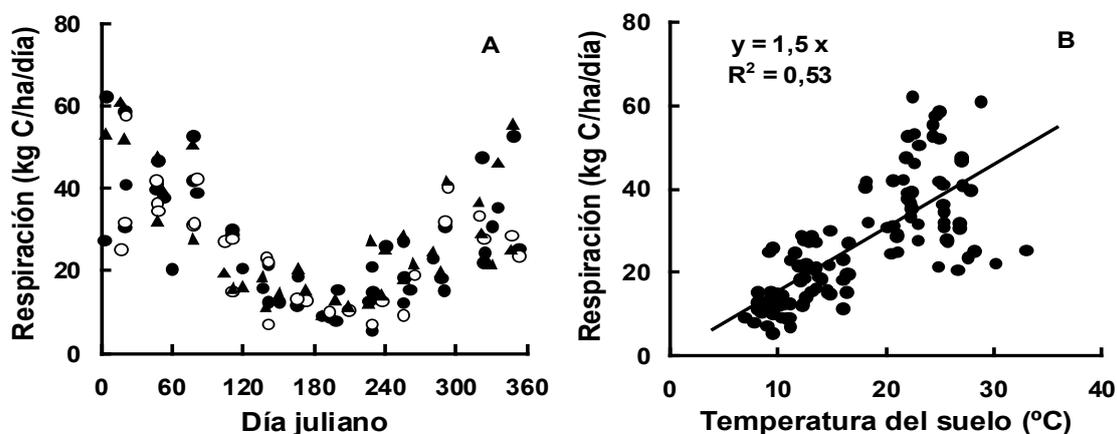


Figura 20.6. (A) Respiración microbiana del suelo en función de los días. (B) Respiración microbiana del suelo en función de la temperatura del suelo. Puntos llenos: labranza con reja y vertedera, triángulos: rastra de discos y puntos vacíos: siembra directa. Adaptado de Álvarez y Steinbach (2010).

Los sistemas de labranza, en particular la labranza convencional, difirieron en la emisión de CO₂ respecto de siembra directa. Esta diferencia se observó algunos días después del pasaje de los implementos de labranza y fue en forma de pulsos de CO₂ (**Figura 20.7a**). La mayor emisión de CO₂ en los suelos labrados responde a un aumento de la temperatura edáfica (**Figura 20.7b**) debido al suelo desnudo, a pesar de tener menor humedad (**Figura 20.7c**). Se estimó que los pulsos de CO₂ post-labranza provinieron en un 50% del C de la MO y el otro 50%, de la descomposición rápida de los residuos enterrados (Álvarez *et al.*, 2001).

En la región pampeana se estimó una disminución del nivel de carbono orgánico promedio del 16%, la cual es baja en relación con la observada en otras áreas cultivadas del mundo en las que se han

reportado disminuciones del 30-50% en los primeros 20-30 cm del perfil del suelo (Guo y Gifford, 2002). Esta disminución se produce principalmente por la reducción de los aportes de carbono al suelo bajo cultivo (Lauenroth *et al.*, 2000), como consecuencia de la práctica del barbecho y la cosecha. En la región pampeana el aporte de los cultivos anuales promedia 30-70% del incorporado en los pastizales naturales (**Figura 20.9**). En la región semiárida pampeana, donde se ha mantenido la rotación agrícola-ganadera, se ha estimado que la vegetación natural aporta al suelo unas 3,9 t C ha⁻¹ año⁻¹. En cambio, una rotación pastura (4 años)-trigo/girasol (4 años) aportó en el período 1970-2004 aproximadamente 2,6 t C ha⁻¹ año⁻¹ (67%).

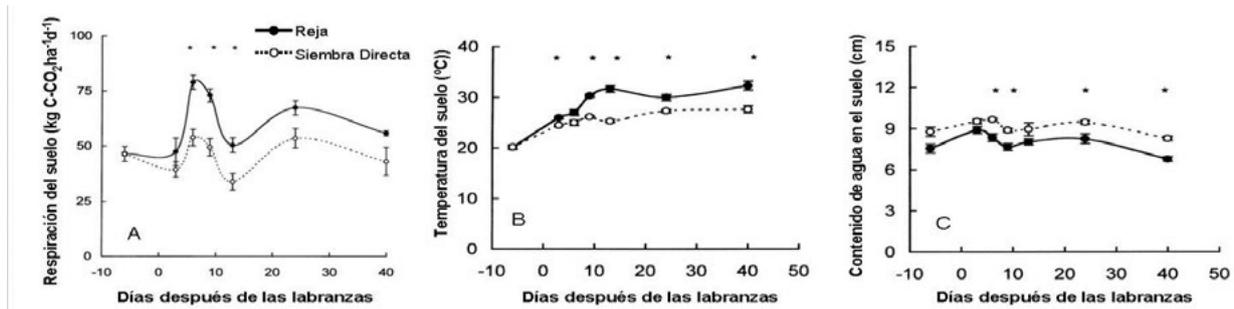


Figura 20.7. (A) Respiración microbiana del suelo en función de los días después de las labranzas. (B) Temperatura del suelo en función de los días después de las labranzas. (C) Contenido de agua del suelo en función de los días después de las labranzas. Las barras verticales indican el error estándar. Los asteriscos indican diferencias significativas. Adaptado de Álvarez *et al.* (2001).

20.2.1.2.2 Óxido nítrico

El N₂O es el principal gas emitido por la agricultura argentina. Proviene del N que entra anualmente a los suelos agrícolas, principalmente, mediante fertilizantes sintéticos y residuos vegetales. En suelos ganaderos el aporte del estiércol y la orina de los animales es también una importante fuente de N. Los principales factores ambientales que controlan la producción de N₂O del suelo son la disponibilidad de N inorgánico (NH₄⁺ y NO₃⁻), la disponibilidad de O₂ (que generalmente se mide por una variable inversa, el porcentaje de poros llenos de agua -PLLA-) y la temperatura. Es decir que a medida que aumenta la temperatura y la disponibilidad de N y los PLLA se acerca a valores intermedios (entre 60 y 80%), la producción de N₂O aumenta (Cosentino *et al.*, 2013). Otros factores indirectos que afectan la emisión de N₂O son la textura del suelo, la cantidad de amonio (NH₄⁺) disponible para la nitrificación y de nitrato (NO₃⁻) para la desnitrificación (Firestone, 1982; Granli y Bockman, 1994).

Los modelos más simples para estimar la emisión de N₂O del suelo, consideran que esta depende únicamente del aporte anual de N al suelo. Bajo este supuesto se suele considerar que para el sector agropecuario hay tres fuentes directas de N₂O: (i) la aplicación de fertilizantes sintéticos en suelos, (ii) la aplicación de estiércol en suelos y (iii) el almacenamiento y manejo de estiércol.

Los principales procesos por los cuales se produce y se emite este gas desde el suelo de los agroecosistemas son la nitrificación y la desnitrificación. La interacción de los factores de control de la nitrificación y desnitrificación son complejos debido a que la cantidad de N₂O producido depende de la concentración de O₂.



Nitrificación-desnitrificación. La emisión de N_2O se produce en forma natural en los suelos mediante los procesos microbianos de nitrificación y desnitrificación. Se denomina nitrificación a la oxidación de NH_4^+ para formar NO_3^- , y desnitrificación a la reducción de NO_3^- en nitrógeno gaseoso (N_2). Ambas reacciones producen N_2O como un producto intermedio de actividades microbianas en el suelo, y eventualmente estos gases se liberan a la atmósfera. La nitrificación, como se mencionó, es la producción de NO_3^- y es un proceso que puede comenzar con la liberación del N de la MO y obtención de NH_4^+ mediante el proceso de amonificación.

Estos procesos tienen mayor probabilidad de ocurrir cuando se agrega N a los suelos. Por ejemplo, cuando se usan fertilizantes sintéticos o fertilizantes orgánicos en base a desechos vegetales y animales. Entonces, los aumentos de emisiones de N_2O relativos a los niveles naturales son contabilizados como adiciones inducidas por las actividades del ser humano

En producción animal, el almacenamiento y manejo de estiércol también contribuye a emisiones de N_2O . La tasa de nitrificación de estiércol almacenado depende de la cantidad de N que contiene, y del O_2 disponible para la reacción química. Los procesos de manejo de estiércol en forma anaeróbica producen baja nitrificación, aunque sí desnitrificación y, consecuentemente, emisiones de N_2O en forma anaeróbica. Entonces, para evaluar las intensidades de emisión debe considerarse en especial cada forma de almacenamiento y manejo de estiércol de la producción animal.

La participación de la nitrificación y la desnitrificación en las emisiones de N_2O depende de factores edáficos, como por ejemplo el contenido de O_2 . A medida que aumenta el porcentaje de poros llenos de agua (PLLA), el contenido de O_2 del suelo disminuye y el proceso de desnitrificación comienza a aumentar su importancia sobre el de nitrificación, en la medida que los NO_3^- reemplazan al O_2 en el papel de aceptor de electrones. La tasa de desnitrificación alcanza su pico máximo cuando los poros llenos de agua superan el 70-80 %, donde el total de las emisiones de N_2O son producidas por dicho proceso (Bateman y Baggs, 2005). Las condiciones anaeróbicas son usualmente producidas por altos valores de PLLA, propias de suelos con drenaje deficiente. En suelos agrícolas esta condición se presenta inmediatamente, y por un corto tiempo, luego de una precipitación considerable. Así es que hay algunos experimentos que se ha podido determinar el valor de PLLA a partir del cual se incrementa abruptamente la emisión de N_2O (Figura 20.8).

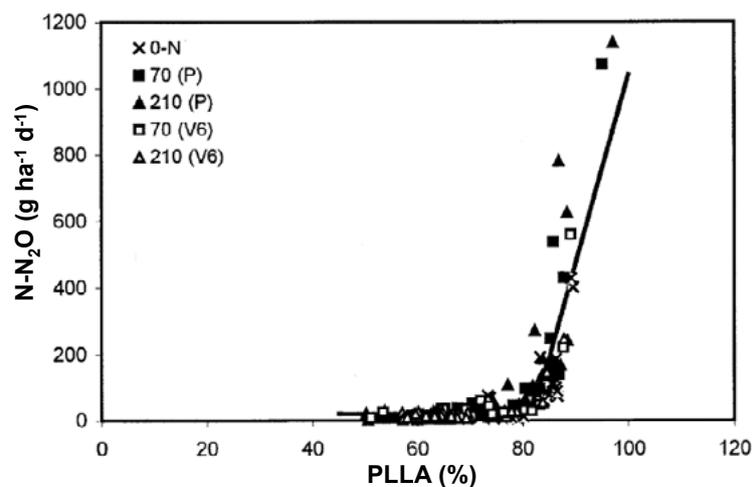
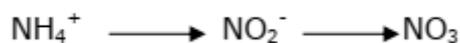


Figura 20.8. Emisión de $N-N_2O$ ($g\ ha^{-1}\ d^{-1}$) en función del porcentaje de poros llenos de agua (PLLA) para diferentes dosis de fertilizante (0, 70, y 210 $kg\ N\ ha^{-1}$) y momentos de aplicación (P, a la siembra; V6, en 6 hojas de maíz); bajo siembra directa en un Argiudol Típico y un Paleudol Petrocálcico de la zona de Balcarce. Adaptado de Sainz Rozas et al. (2001).

El proceso de desnitrificación ocurre cuando el NO_3^- es reducido a N_2 . Cuando el O_2 es limitante las bacterias utilizan el NO_3^- como aceptor de electrones utilizando, a su vez, carbono orgánico como fuente de energía. En estas condiciones son promovidos los microorganismos desnitrificadores, que son anaerobios facultativos (fundamentalmente pertenecientes a los géneros *Bacillus* sp. y *Pseudomonas* sp.).



La nitrificación es llevada a cabo por microorganismos aeróbicos que oxidan el NH_4^+ a NO_2^- (*Bacillus* sp. y *Pseudomonas* sp.) y luego estos se oxidan a NO_3^- (*Nitrosomonas* sp.). Durante este proceso pueden existir pérdidas de N_2O a partir de NO_2^- (Ritchie y Nicholas, 1972). El NH_4^+ que inicia la reacción puede provenir de la MO o de un fertilizante nitrogenado.



Fijación biológica de nitrógeno. La introducción de leguminosas a los sistemas agrícolas y ganaderos permite fijar nitrógeno atmosférico (N_2) biológicamente, pero también puede contribuir con la emisión de N en forma gaseosa a través de la emisión de N_2O . En la fijación biológica de nitrógeno (FBN), determinados grupos de bacterias del suelo capturan N_2 , rompen su triple enlace, y lo reducen NH_3 y luego esta molécula es incorporada para la síntesis de sus propios aminoácidos o de las células de la planta asociada. Este proceso puede contribuir a las emisiones de N_2O fundamentalmente a través de dos vías: (i) como resultado del N fijado en la biomasa bacteriana o en residuos vegetales ricos en N, de rápida descomposición, que puede ser nitrificado y luego desnitrificado (Huang *et al.*, 2004; Ciampitti *et al.*, 2008), y (ii) mediante la presencia de algunos organismos fijadores de N (bacterias rizobáceas) que son capaces de desnitrificar directamente desde el nódulo, (O'Hara y Daniel, 1985; Delgado *et al.*, 2007).

Al igual que los desnitrificadores más comunes (organismos heterótrofos de los géneros *Pseudomonas* y *Alcaligenes*), los organismos fijadores de N_2 que desnitrifican crecen mejor en condiciones de aerobiosis que en condiciones de anoxia (Zhong *et al.*, 2009). Debido a que el producto final de los fijadores más activos de N que desnitrifican es N_2O más que N_2 (Bedmar *et al.*, 2005; Okada *et al.*, 2005), la FBN podría, en teoría, aumentar la concentración de N_2O atmosférico, ya que fija N_2 para emitir una fracción como N_2O .

20.2.1.2.3 Metano (CH_4)

En este capítulo se considerarán tres fuentes de CH_4 en la producción agropecuaria: (i) el almacenamiento y manejo de estiércol; (ii) la fermentación entérica y; (iii) el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.). En el caso de (i) el almacenamiento y manejo del estiércol puede producir emisiones de CH_4 , principalmente desde los efluentes líquidos del estiércol, los cuales son usuales en los corrales de engorde intensivo de vacunos, la producción lechera, la cría intensiva de cerdos y en producciones avícolas. El CH_4 es un producto de la degradación de MO en condiciones anaeróbicas. Finster (2014) señala que el tratamiento del estiércol del ganado produce emisiones de CH_4 (mediante la descomposición

anaeróbica del estiércol) y de N_2O (mediante la desnitrificación del N orgánico presente en el estiércol y en la orina del ganado). Cuando el estiércol se dispone en sistemas que promueven las condiciones anaeróbicas (e.g. en forma líquida en lagunas, tanques o fosas), la descomposición de la materia tiende a producir CH_4 . Cuando el estiércol se maneja en forma sólida (e.g. almacenamiento en pilas) o queda depositado sobre las pasturas y los campos naturales, tiende a descomponerse aeróbicamente y produce muy poco o nada de CH_4 . La temperatura y la humedad influyen en el desarrollo de las *archaeobacterias* responsables de la formación de CH_4 . La composición del estiércol, que depende de la dieta de los animales, también afecta la cantidad de CH_4 producido. Cuanto mayor es el contenido energético y la digestibilidad del alimento, mayor es el potencial de emisión. Por ejemplo, los animales en “feedlot”, alimentados con dietas altamente energéticas, generan estiércol con gran capacidad de producción de CH_4 , mientras que el ganado mantenido con forrajes de baja digestibilidad produce estiércol con menor capacidad de formación de dicho gas.

Los herbívoros, y en mayor medida los rumiantes, son los responsables de la emisión desde la (ii) fermentación entérica. La celulosa y otros carbohidratos se digieren con ayuda de la actividad bacteriana en el rumen. En la fermentación entérica, las archaeobacterias metanogénicas son las responsables de la producción del CH_4 y, si bien constituyen una fracción muy pequeña de la población microbiana total, cumplen una función muy importante, al proveer uno de los mecanismos más eficientes para eliminar el hidrógeno producido en el rumen. Cuando el alimento consumido está compuesto por un alto porcentaje de fibra, el principal ácido graso volátil que se forma es el acético. En estas condiciones, queda una cantidad de iones hidrógeno libres en el rumen, que es capturada por las bacterias metanogénicas y combinada con el dióxido de carbono, para dar origen al CH_4 . Si el alimento es rico en almidón, el principal producto de la fermentación es el ácido propiónico, con menor generación de CH_4 (Finster, 2014). La fermentación producida por los microorganismos libera CH_4 , dependiendo la cantidad emitida del tipo de animal, y de la calidad y cantidad de los alimentos que ingiere. Entre las especies ganaderas, los rumiantes (bovinos, ovinos, caprinos, búfalos, camélidos) son los principales emisores de metano (Finster, 2014). Los rumiantes que producen mayores cantidades de CH_4 son el ganado vacuno y ovino, y se consideran para los cálculos las condiciones de domesticación estándar. El CH_4 se produce en la digestión y se elimina directamente por boca o heces en forma gaseosa. La emisión expresada por animal y por peso vivo producido es mayor en los sistemas de producción extensivos. Sin embargo, la emisión de CH_4 estimada por superficie ganadera o superficie utilizada es mayor en los sistemas intensivos de producción.

Otra fuente de emisión desde la agricultura son los cultivos que se realizan en anegamiento, como lo es la mayor parte del arroz. Existen microorganismos en el suelo bajo el agua que emiten CH_4 , y su transporte a la atmósfera es facilitado por los tallos de las plantas. En relación al (iii) cultivo de arroz se trata de una producción bajo inundación y es una fuente importante de CH_4 antropogénico por realizarse en condiciones anaeróbicas (Neue, 1993). Este cultivo se produce mayormente en las provincias de Entre Ríos y Corrientes, donde representa un 89,5% de la producción total. En corrientes la producción se concentra en el centro sur de la provincia, por la naturaleza y el régimen de sus cuencas. Allí, las explotaciones arroceras se ubicaron, inicialmente, en función de la disponibilidad del recurso agua, es decir, en márgenes de ríos y de lagunas. Luego se dio una expansión de la superficie sembrada con arroz (*Figura 20.9*). A partir de la década de los 90, la actividad arroceras se expandió y desplazó principalmente hacia la región centro-sur y la zona costera del río Uruguay gracias a la oferta hídrica de la zona (*Figura 20.10*). En la *Figura 20.10* se observa el aumento de la superficie sembrada con arroz en Corrientes.

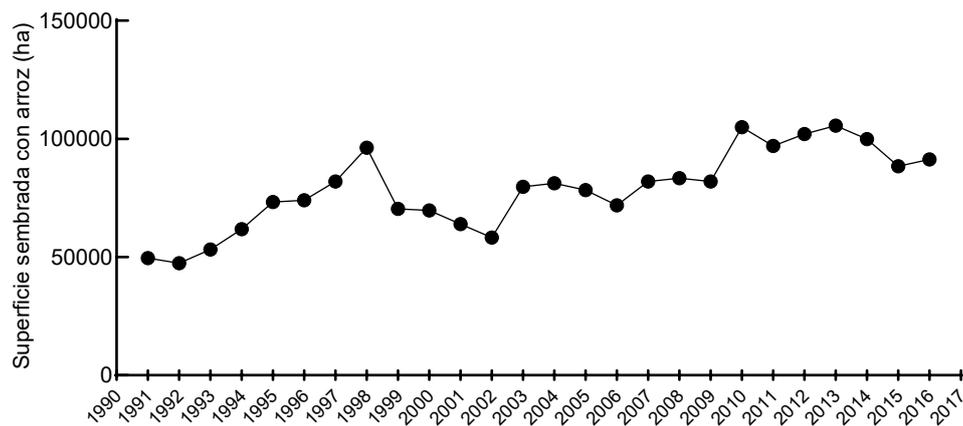


Figura 20.9. Superficie sembrada con arroz en la provincia. Fuente: adaptada de Baez y Cortizas (2018).

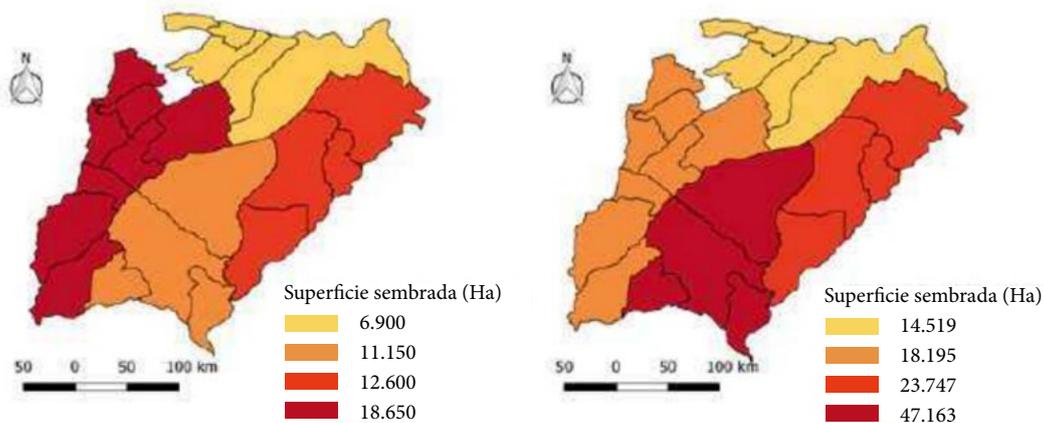


Figura 20.10. Superficie sembrada con arroz en la provincia Corrientes por cosecha según zona productiva. Extraído de Baez y Cortizas (2018).

La emisión de CH_4 desde los cultivos de arroz son importantes por el potencial de mitigación de la concentración de gases en la atmósfera, ya que podrían ser modificadas las tasas de emisión de CH_4 a través de técnicas de manejo (Cole, 1996). La tasa de emisión de CH_4 desde los arrozales depende del crecimiento de las plantas (Figura 20.11), la disponibilidad de sustratos de C en el suelo, el manejo (*i.e.* el régimen de irrigación, la cantidad y tipo de fertilizante, el retorno de residuo al suelo) y el clima (Neue, 1993; Neue *et al.*, 1996). El movimiento de CH_4

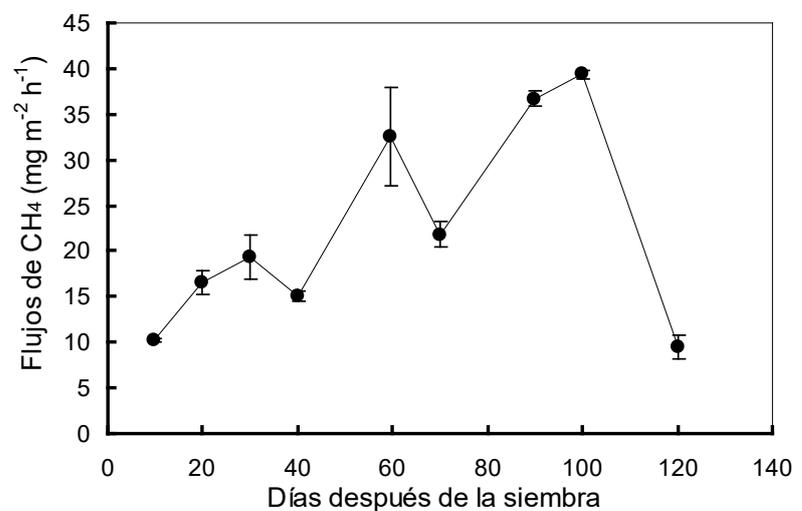


Figura 20.11. Flujos de CH_4 para diferentes días a lo largo del ciclo ontogénico del arroz. Adaptado de Nayak *et al.* (2006).

desde el suelo al aire es mediado mayormente por la planta de arroz, mediante la difusión de CH_4 desde la rizósfera a través del tallo, y su salida por los microporos de las hojas (Nouchi *et al.*, 1990).

20.2.2. Destrucción de la capa de ozono

La radiación UV proveniente del sol y disocia los átomos del O_2 y estos reaccionan con otras moléculas de O_2 para formar ozono (O_3). A su vez, el O_3 absorbe la radiación UV, proceso en el que se desprenden átomos de O_2 . Estos procesos combinados representan un equilibrio dinámico natural en la formación y destrucción del ozono que implica la absorción de gran parte de la radiación UV. Sin embargo, este equilibrio es alterado por la presencia de algunas sustancias que, al alcanzar la estratosfera, reaccionan con el O_3 y aceleran su destrucción. Este desbalance genera un adelgazamiento de la capa de ozono y, por consiguiente, una reducción de su capacidad de absorber radiación UV. Este adelgazamiento es lo que se conoce como agujero de ozono.

Las principales sustancias responsables de la destrucción del ozono estratosférico (ODSs, ozone-depleting substances) son los compuestos clorofluorocarbonados (CFC), gases que también tienen efecto invernadero. Son sustancias sintéticas utilizadas ampliamente en la aislación térmica, en la industria de la refrigeración y de aerosoles desde la década de 1950 hasta fines de los 90, cuando los investigadores Paul Krutzen, Mario Molina y Sherwood Rowland denunciaron su efecto dañino sobre la capa de ozono. A partir de este descubrimiento, se constituyó en el Protocolo de Montreal un acuerdo internacional para eliminar la producción y emisión de los CFC y otras ODSs. Entre 1990 y 1995 se alcanzó la concentración máxima de unos de los principales CFC, el triclorofluorometano, cercana a 265 ppt (Figura 20.12). En 2010 se consideró que la emisión de CFC se eliminó totalmente. Sin embargo, un informe de la Organización Meteorológica Mundial, basado en datos de la “National Oceanic and Atmospheric Administration” y del “Massachu-

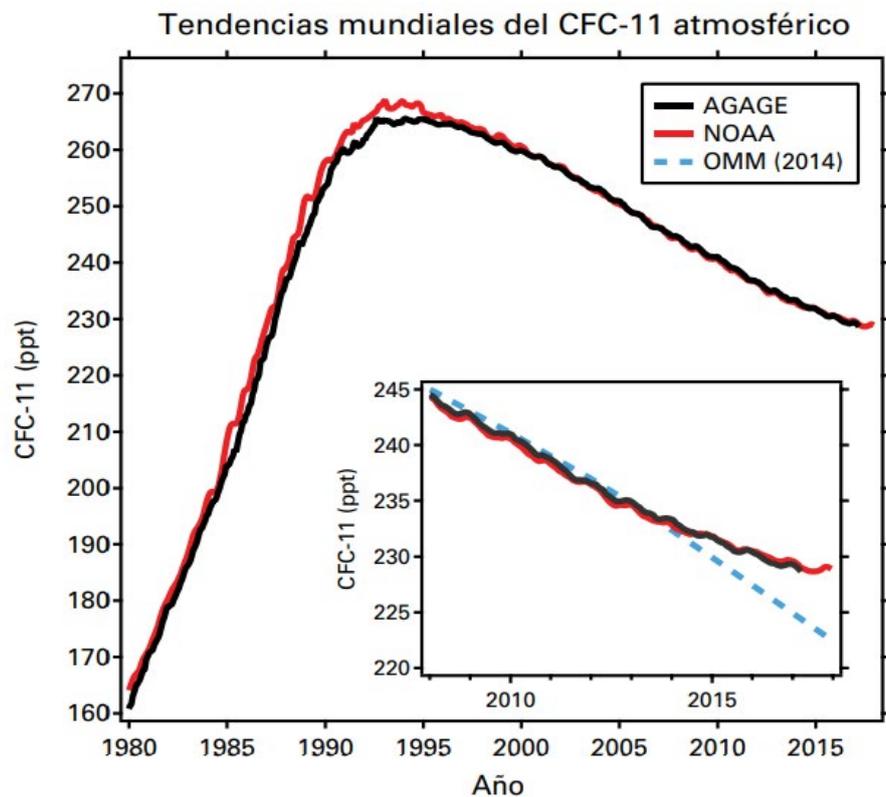


Figura 20.12. Dinámica temporal de la concentración global de triclorofluorometano (CFC-11) según las redes de medición del Experimento Mundial Avanzado sobre Gases en la Atmósfera que depende del Massachusetts Institute of Technology (AGAGE) y de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera de EE.UU. (NOAA). La línea punteada muestra la tendencia prevista por la Organización Meteorológica Mundial en 2014. Fuente: OMM (2018).

setts Institute of Technology”, denunció que la tasa de disminución de la concentración de CFC-11 se redujo desde el año 2012 (**Figura 20.12**). Esta ralentización de la disminución de la concentración parece deberse a nuevas emisiones de CFC en Asia Oriental (OMM, 2018).

Más allá de esta pequeña tendencia observada en los últimos años, el Protocolo de Montreal resultó una herramienta eficaz para reducir y casi eliminar la emisión de CFC a nivel mundial y permitir así la actual progresiva restitución de la capa de ozono. La eficacia de este protocolo se basó, en parte, en el hecho que las principales sustancias responsables de la destrucción del ozono eran sustancias sintéticas, no producidas por la naturaleza, y que pudieron ser reemplazadas en su función por nuevas sustancias no dañinas para el ozono. Sin embargo, hay otra sustancia, el N_2O , que también tiene la capacidad de destruir el ozono estratosférico y que muestra una tendencia creciente en su concentración.

Un estudio publicado en 2009 demostró que, con la proyección de la concentración atmosférica de CFC decreciente y la concentración de N_2O creciente, este gas es hoy la principal sustancia responsable de la destrucción del ozono y lo seguirá siendo por el resto del siglo (Ravishankara *et al.*, 2009). Los resultados de este estudio se basan en las proyecciones de las emisiones de las diferentes sustancias que destruyen el ozono expresadas como potencial de destrucción de ozono ponderado. Esta medida expresa la capacidad de destruir el ozono estratosférico de cada sustancia con respecto a la capacidad de destrucción que posee el CFC-11 (**Figura 20.13**). El 52% de la emisión antropogénica de N_2O global proviene de los suelos agrícolas (Park *et al.*, 2012; Tian *et al.*, 2020). Por lo tanto, el problema de la destrucción de la capa de ozono y el posible crecimiento del agujero de ozono dependen fuertemente del uso y manejo que se haga de los suelos bajo producción agropecuaria.

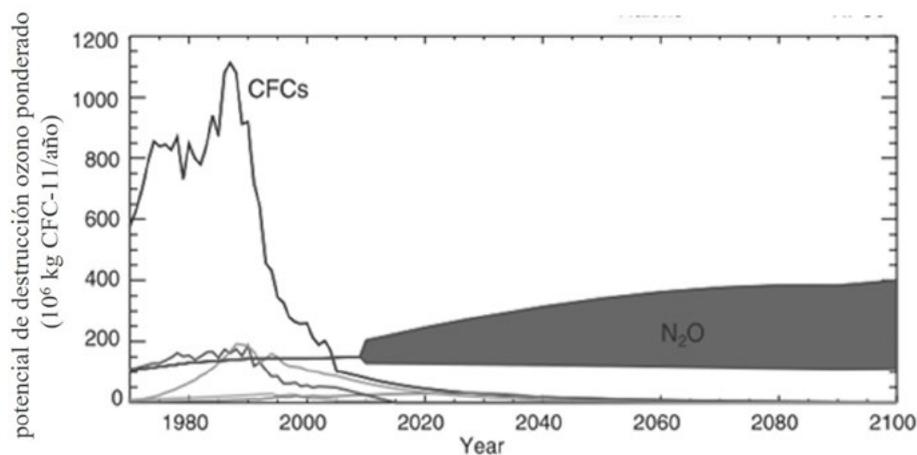


Figura 20.13. Emisión histórica y proyectada de los principales sustancias que destruyen el ozono (ODS) expresada como potencial de destrucción ozono ponderado (ODP-weighted). Las líneas que muestran menores valores de emisión corresponden al bromuro de metilo (CH_3Br), hidroclorofluorocarbonos (HCFC), cloruro de carbono (CCl_4) y halones (Ravishankara *et al.*, 2009).

20.2.3. Contaminación atmosférica

Contaminación atmosférica es la impurificación de la atmósfera por inyección y permanencia temporal en ella de materias gaseosas, líquidas y sólidas, o radiaciones ajenas a su composición natural o en proporción superior a aquélla (Orozco Barrenetxea *et al.*, 2008).

20.2.3.1. Partículas en suspensión o material particulado

El material particulado total en suspensión (PTS) en la actualidad se especifica al tamaño del material particulado (PM, del inglés). La característica más importante del PM es su tamaño, ya que tiene gran impacto en su comportamiento. El tamaño de las partículas de importancia ambiental va desde muy pequeñas (0,01 μm) a muy grandes (1000 μm). Cuando se menciona el diámetro de las partículas se hace referencia al diámetro aerodinámico a partir de partículas que tienen diferentes formas y densidades. La fórmula utilizada para el diámetro aerodinámico de la partícula es:

$$d_{ac} = d_{stokes} * \text{raíz}(d_p)$$

Ecuación 20.1

donde, d_{ac} : diámetro aerodinámico de la partícula (μm); d_{stokes} : diámetro de Stokes (μm); d_p : densidad de partículas (g cm^{-3}).

Partículas de distintas formas y densidades pueden tener los mismos diámetros aerodinámicos, y partículas de la misma forma, pero con distintas densidades pueden tener diferentes diámetros aerodinámicos. El diámetro de Stokes es el diámetro correspondiente a una esfera que tiene la misma densidad y velocidad límite en el fluido de la partícula original. Esta variable se basa en las fuerzas aerodinámicas de arrastre causadas por la diferencia en la velocidad de la partícula y el fluido que la rodea. El diámetro Stokes es igual al diámetro real si la partícula es esférica.

El origen de las partículas determina sus dimensiones y su composición. Los cuatro procesos que liberan o dan lugar a las partículas son: (i) fricción o rozamiento físico, (ii) combustión de combustibles, (iii) nucleación homogénea y heterogénea a partir de la fase vapor de los compuestos en flujos gaseosos calientes, y (iv) liberación de sólidos durante la evaporación de gotas en flujos gaseosos calientes. El (i) rozamiento físico se produce por el rozamiento o fricción de superficies rugosas. La composición y la densidad de partículas son idénticas a las del material de origen. El tamaño va de 10 a 1000 μm . La (ii) combustión de combustible es inyectado a quemadores o calderas y el proceso de combustión progresa, este se volatiliza y oxida produciendo cenizas y partículas de carbón. El rango de estas suele ser entre 1 a 100 μm . El proceso de (iii) nucleación homogénea y heterogénea consiste en la conversión de fase vapor de un compuesto a partículas líquidas cuando la temperatura baja y se llega al punto de rocío. La (iv) nucleación homogénea tiene igual composición que el vapor de origen y las heterogéneas, tienen distinta composición y/o distintos materiales. El rango de tamaño es de 0,1 a 1 μm . La evaporación de gotas se produce cuando el material sólido disuelto en las gotas se libera al evaporarse el líquido, y cuyo material sólido entra en suspensión.

En función de esta caracterización se distinguen partículas de 10 μm o menores de ese diámetro (PM_{10}) y partículas de 2,5 μm o menores diámetro ($\text{PM}_{2,5}$). La razón fundamental de esta especificación e importancia de las mismas debe a que las partículas más pequeñas son más peligrosas para la salud de los seres humanos porque son capaces de alcanzar la zona inferior de los pulmones.

Desde la década de los 70 y principios de los 80 varios estudios determinaron la importancia que tenían las partículas en el rango de diámetros 10 μm y menores (PM_{10}) como generadoras de efectos adversos sobre la salud y se observó que sus efectos sobre la salud eran más preocupantes que partículas de diámetros mayores. El tiempo de suspensión está relacionado al tamaño de la partícula y su presencia en suspensión podría conducir, también, a la reducción de la visibilidad. Las partículas suspendidas pueden

ser químicamente inertes, o activas causando diferentes daños dependiendo de su composición química y estado físico. A mediados de 1980 se comenzaron a analizar los posibles efectos adversos de las partículas con diámetros menores a $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$). La composición de esas partículas es considerablemente diferente de las partículas de diámetro mayor. La composición química es otra de las características importantes. La absorción y la nucleación heterogéneas de vapores tóxicos sobre partículas existentes pueden crear partículas de mayor toxicidad. La mayoría de las partículas de diámetros menores de $2,5 \mu\text{m}$ se forman por alguno de los siguientes mecanismos: (i) nucleación heterogénea de sustancias desde la fase vapor, (ii) nucleación homogénea de sustancias desde la fase vapor, o (iii) reacciones de gases que forman vapores que luego irán a formar partículas por nucleación.

Entre las fuentes naturales de partículas hay de tipo líquido, sólido y biológico. Algunos ejemplos son los aerosoles marinos, minerales, incendios forestales, erupciones volcánicas, polen de plantas, bacterias. Entre las fuentes antropogénicas, la presencia de partículas en suspensión se puede deber a los procesos de combustión industrial y agrícola, a la quema de residuos sólidos urbanos, a la erosión antrópica, entre otros. Los compuestos inorgánicos más frecuentes son sales y óxidos (Ca, K y Al) por erosión e industria y sodio en aerosoles marinos. Entre los compuestos orgánicos naturales se encuentran los terpenos y aceites esenciales vegetales, y entre los antropogénicos, los hidrocarburos alifáticos y cíclicos, plaguicidas, entre otros. Además, los contaminantes primarios al interactuar con la atmósfera dan origen a los contaminantes secundarios: sulfatos y NO_3^- (provenientes de óxidos de S y N), cloruros (aerosoles marinos), NH_4^+ , silicio (erosión).

Los efectos en los ecosistemas se evidencian al quedar cubiertas las hojas por partículas atmosféricas que interfieren con la fotosíntesis y reducen el crecimiento de cultivos. En los animales y las personas, las partículas gruesas no llegan a los pulmones, pero pueden producir efectos alérgicos e infecciones. Los efectos nocivos sobre la salud humana y animal están fuertemente vinculados al tamaño y cantidad de partículas finas que son inhaladas, ingeridas, o que entran en contacto con los ojos. Por ello, uno de los criterios para evaluar la calidad del aire es mediante la medición de partículas suspendidas en su fracción respirable denominada PM_{10} por ser, como se explicó anteriormente, el tamaño de partícula que puede penetrar en el aparato respiratorio hasta los alvéolos pulmonares. Los valores normales de PM_{10} deben estar por debajo de $150 \mu\text{g m}^{-3}$ en un promedio de 24 h.

En la Argentina se presentaron se pueden citar dos casos emblemáticos de contaminación por partículas en suspensión. Uno fue de origen natural y se debió a la erupción del volcán Puyehue (Chile, al sur de la provincia de Neuquén en la Argentina) en junio de 2011; y otro antrópico debido a la quema de pastizales en 2008 en la región del Delta del Paraná. En el primer caso, los aportes de cenizas del volcán Puyehue afectaron una amplia región de la Argentina, alcanzando la ciudad de Buenos Aires, como mostró un monitoreo realizado casi 2 meses después de la erupción (concentraciones entre 153 y $400 \mu\text{g m}^{-3}$, es decir, valores superiores al nivel de referencia). Por otro lado, las quemadas de pastizales en las islas del Delta del Paraná abarcaron casi 70.000 ha, provocando una nube de humo con numerosos inconvenientes a la población y obligó a restricciones en el tránsito terrestre, marítimo y aéreo.

2.3.2. Contaminantes gaseosos primarios y secundarios

Los contaminantes primarios son aquellos que conservan la forma con la que son emitidos directamente de la fuente (*Cuadro 20.3*). Los secundarios se originan como consecuencia de la interacción

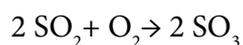


entre los contaminantes primarios, los componentes naturales de la atmósfera y las radiaciones incidentes en la misma (*Cuadro 20.3*).

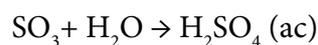
Cuadro 20.3. Clasificación de compuestos contaminantes, y sus formas primarias y secundarias. Adaptado de Colangelo (2003).

Clase	Contaminantes primarios	Contaminantes secundarios
Compuestos azufrados	SO ₂ , H ₂ S	SO ₃ , H ₂ SO ₄ , MSO ₄
Compuestos nitrogenados	N ₂ O, NO, NH ₃	NO ₂ , MNO ₃
Compuestos orgánicos	Compuestos de C ₁ -C ₅	Cetonas, aldehídos, ácidos
Compuestos con carbono	CO, CO ₂ , CH ₄	Ninguno
Halógenuros de hidrógeno	HCl, HF	Ninguno
Clorofluorocarbonados	CFC-11: CFCl ₃ trifluoromonoclorados CFC-12 CF ₂ Cl ₂ difluordiclorometano	Ninguno
Dioxina	2, 3, 7, 8-tetraclorodibenzo-p-dioxina (2, 3, 7, 8-TCDD)	Ninguno

Compuestos azufrados: tienen un origen natural (a través de la descomposición anaeróbica de la MO (H₂S), los océanos, las erupciones volcánicas), o, de manera más significativa, antropogénica (en particular, a través de la actividad industrial). En la emisión de estos gases toman relevancia los países más industrializados. Los más relevantes son el dióxido de azufre (SO₂) y trióxido de azufre (SO₃). Este último proviene del SO₂ mediado por reacciones fotoquímicas en la atmósfera (*Ecuación 20.2*). Por lo tanto, el SO₃ es un contaminante secundario, mientras que el SO₂ es un contaminante primario. El SO₃, a su vez, pasa a ácido sulfúrico (H₂SO₄) debido a la humedad del aire (*Ecuación 20.3*).



Ecuación 20.2



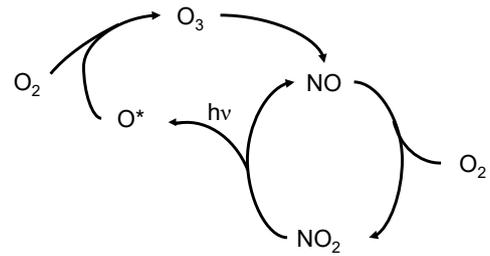
Ecuación 20.3

A partir de las *Ecuaciones 20.2 y 20.3*, queda manifestado que la presencia de dióxido de azufre puede originar la lluvia ácida. El agua de lluvia en condiciones normales tiene un pH cercano a 7, pero por la disolución del CO₂ atmosférico, el valor señalado tiende a bajar por la formación de ácido carbónico, alcanzando valores alrededor de 6. La presencia de gases como óxidos de azufre y de nitrógeno, que por la humedad atmosférica forman los ácidos respectivos generan el fenómeno que recibe el nombre de lluvia ácida. Se considera lluvia ácida cuando el pH del agua de lluvia es inferior a 5,5. Uno de los efectos de la lluvia ácida en los ecosistemas es la disminución del pH de aguas de ríos y lagos que afecta la vida acuática. El incremento de la acidez del suelo favorece procesos de lixiviación de nutrientes (Ca, Mg, K) y movilidad de elementos potencialmente tóxicos (Cd, Ni, Mn, Pb) con riesgo de contaminar las aguas. Por último, los ecosistemas forestales son seriamente dañados.

Compuestos nitrogenados: tienen diferentes orígenes de acuerdo con las formas químicas que posean. El monóxido de nitrógeno (NO) es un gas incoloro tóxico, que interviene en procesos fotoquímicos en la tropósfera. El origen es de tipo antropogénico, y se produce como consecuencia de procesos



de combustión. El dióxido de nitrógeno (NO_2) tiene un color pardo-rojizo, es tóxico, y también interviene en procesos fotoquímicos en la tropósfera. Su presencia es consecuencia de procesos de combustión. El NO sufre un proceso lento y constante de oxidación a NO_2 y responde al ciclo fotolítico de óxidos de N. El NO_2 absorbe radiación en longitudes de onda de 380 nm, disociándose en NO y oxígeno atómico (O^*). El O^* reacciona con el O_2 originando O_3 . En condiciones normales el O_3 reacciona con el NO originando NO_2 liberando O_2 . Este ciclo indica que se pueden originar alteraciones de la capa de ozono, ya que reacciona con el O_3 . Las alteraciones se presentan por cambios en la concentración de NO y NO_2 .



El ciclo presentado, indica que puede originar alteraciones de la capa de ozono, ya que reacciona con el ozono. Las alteraciones se presentan por cambios en la concentración de NO y NO_2 .

El NO_2 es un óxido-ácido como el SO_2 . Es así que su presencia en la atmósfera también contribuye con el fenómeno de lluvia ácida:

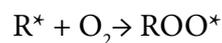


Ecuación 20.4

El óxido nitroso (N_2O) es la forma química que más interesa por provenir de los agroecosistemas. El N_2O es incoloro, no es tóxico y no interviene en procesos fotoquímicos troposféricos. Si bien se encuentra naturalmente en la atmósfera, las emisiones provienen principalmente de las actividades agropecuarias. Este gas será tratado en el apartado de gases de efecto invernadero (GEI), ya que contribuye con el mismo, "cerrando la ventana" de la radiación infrarroja emitida desde la superficie terrestre.

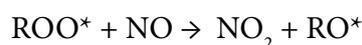
El amoníaco (NH_3) es otro compuesto nitrogenado gaseoso, que es aportado desde la actividad industrial como de los agroecosistemas por actividad ganadera y por uso de fertilizantes. En general las pérdidas de NH_3 por volatilización están relacionadas, así como las emisiones de N_2O del suelo, y constituyen una proporción del nitrógeno total que ingresa a los agroecosistemas (Del Grosso *et al.*, 2006).

Compuestos orgánicos: el oxígeno atómico (O^*) puede reaccionar con muchos compuestos orgánicos para formar radicales libres, como también puede hacerlo el O_3 . La interacción del radical libre con el O_2 origina un radical peróxido:



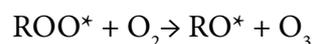
Ecuación 20.5

La presencia de hidrocarburos aumenta el nivel de dióxido de nitrógeno en la atmósfera, más allá del ciclo fotolítico:



Ecuación 20.6

De la reacción entre peróxido con O_2 , se tiene una fuente adicional de O_3 :



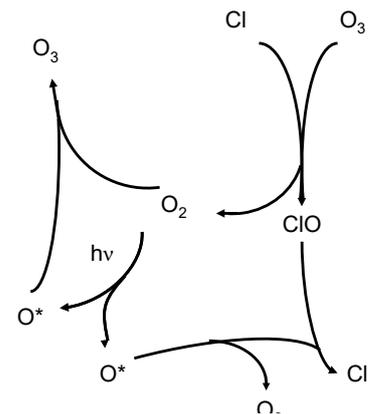
Ecuación 20.7



En la formación de radicales libres, muchos de los compuestos presentes en el aire son en sí fotoquímicamente reactivos (*e.g.* aldehídos, cetonas, peróxidos, etc.). Como consecuencia de esto por cada molécula de hidrocarburo oxidado se producen dos moléculas de NO_2 y en forma indirecta se aumenta la concentración de O_3 troposférico (contaminante secundario).

Compuestos carbonados: entre los óxidos de carbono se encuentran el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO_2). En general, las fuentes de estos gases en la atmósfera son naturales (> 90%) como la respiración de plantas y animales e incendios naturales. Además, el transporte, la quema de residuos, refinería de petróleo y cualquier combustión contribuye con la presencia de estos gases en la atmósfera. El CO_2 y el CH_4 son gases emitidos desde los agroecosistemas y por los niveles de contribución desde los mismos es que serán tratados en el apartado correspondiente. El CO se forma mediante la oxidación del CH_4 . La principal fuente antropogénica de CO es la combustión incompleta de combustibles carbónicos, cuando no hay suficiente O_2 para que se convierta completamente en CO_2 . Las principales fuentes de este contaminante en zonas urbanas son los motores de combustión interna usadas para el transporte. Otras fuentes importantes son las industrias fundidoras, las refineries de petróleo, los molinos para pulpa de papel, las fábricas de acero, y la incineración de la basura. No tiene color ni olor, puede ser un gas asfixiante ya que ocupa el sitio de O_2 en los glóbulos rojos.

Clorofluorocarbonados (CFC): tienen su origen en aerosoles, líquidos refrigerantes, solventes, espumas, industria de plásticos, entre otros. Los CFC llegan inalterados a la estratosfera, lugar en el cual la radiación UV produce la ruptura de las moléculas para liberar átomos de cloro (Cl) que interactúan con el O_3 , contribuyendo así a la alteración de la capa de ozono. Esta reacción se desata cada vez que se libere el Cl.



Dioxinas y furanos: hacen referencia a los compuestos químicos organoclorados, es decir, compuestos aromáticos en presencia de cloro. Las dioxinas o PCDD son compuestos dibenzo-p-dioxina policlorada, formados por un núcleo básico de dos anillos de benceno unidos por dos átomos de O_2 en el cual puede haber como sustitutos de uno a ocho átomos de Cl. La dioxina más estudiada y tóxica es la 2, 3, 7, 8 -tetracloro-dibenzo-p-dioxina, conocida comúnmente como TCDD. Los furanos o PCDF (dibenzo-furano-policlorados) son compuestos de estructura y efectos similares a las dioxinas y cuyas fuentes de generación son las mismas. Estos compuestos aparecen como un subproducto de procesos industriales en los que interviene el Cl (producción del plástico, de plaguicidas y disolventes organoclorados), durante procesos de combustión (incineradores de residuos peligrosos o durante incendios accidentales de materiales industriales, urbanos), manejo con quema de agroecosistemas. Las fuentes de PCDD y PCDF (WHO/EURO, 1987) pueden ser divididas en dos grandes grupos, o de los productos químicos y de los procesos de combustión: (i) productos químicos como PCB (formación de furanos solamente), componentes del agente-naranja (2,4,5-T e 2,4-D), pentaclorofenol, hexaclorofeno, herbicidas del grupo difenileter, benzenos clorados, compuestos de cloro y bromo; o (ii) procesos de combustión, como incineradores de basura municipales, incineradores de residuos industriales, incineradores de lodos, incineradores hospitalarios, plantas de preparación de carbón, termoeléctricas a carbón, recuperación de alambres, producción de papel y celulosa, quema abierta de residuos de madera, vehículos automotores, humo de cigarrillo, chimeneas que queman madera, acerías, fundiciones de cobre, etc.

En el caso de agroecosistemas subhúmedos a semiáridos que tienen como destino productivo la ganadería, el fuego se presenta muchas veces de forma natural, pero otras veces resulta de una práctica de manejo, que controlado permite mejorar la calidad forrajera de la vegetación mediante el rebrote. El fuego también se usa para facilitar la siembra (como es el caso de caña de azúcar), eliminar residuos de cultivos, aportar nutrientes para el cultivo siguiente y controlar enfermedades e insectos (e.g. picudo del algodonero). Los PCDD/PCDF se forman en cantidades muy pequeñas, del orden de los microgramos por tonelada de material quemado ($\mu\text{g t}^{-1}$, ppm), y están presentes cuando hay C orgánico y Cl, en presencia de O_2 y temperaturas entre los 200 a 650 °C (PNUMA, 2005).

Los contaminantes del aire también se han clasificado como “contaminantes criterio”. Los “contaminantes criterio” se han identificado como comunes y perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se los llamó “criterio” porque fueron objetos de estudios de evaluación publicados en los primeros documentos de calidad de aire. A nivel internacional los contaminantes criterio son: monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O_3), plomo, material particulado. Estos son lo que suelen aparecer en las tablas de las “normas de calidad de aire”. Luego, otros contaminantes empezaron a ser considerados. Es así que el plomo viene siendo reemplazado en las tablas de calidad de aire por el benceno ya que casi no se expende naftas con plomos desde hace años.

Las fuentes de emisión de los contaminantes al aire suelen agruparse en fuentes fijas y móviles. Dentro de las fuentes fijas se encuentran: emisiones por chimeneas, fugas en equipos y cañerías, emisiones por procesos industriales, emisiones en comercios (tintorerías), residuos e incineración de residuos, incendios forestales y quemas, agricultura, grupos electrógenos. En las fuentes móviles se incluye: automóviles y motocicletas, vehículos de transporte de pasajeros, vehículos de transporte de carga, trenes, barcos.

20.4. Cambios en el balance de energía asociados al uso del suelo

A nivel global, el uso del suelo y los cambios en el uso del suelo tienen un efecto directo sobre el balance de radiación y, por ende, en la temperatura del planeta por dos vías diferentes: (i) la bioquímica y (ii) la biofísica. La primera hace referencia a la emisión de GEI como CO_2 , CH_4 y N_2O explicada detalladamente en la sección anterior. La vía biofísica, se refiere a los cambios en el albedo, la partición entre pérdida de energía por calor sensible o calor latente o los cambios en la rugosidad de la superficie debido a los cambios en la cobertura y uso del suelo (De Fries *et al.*, 2004). Ambas vías pueden tener un efecto positivo (aumento de la radiación neta y calentamiento) o negativo (disminución de la radiación neta y enfriamiento) en el balance de radiación de la superficie terrestre. Por lo tanto, el efecto neto de un cambio en el uso del suelo particular sobre la temperatura depende del balance entre ambas vías.

En primer lugar, cambios en la cobertura y uso del suelo afectan el albedo de la superficie. De este modo, si se reemplaza un bosque por un cultivo agrícola anual el albedo aumenta, y el balance de energía se hace más negativo, es decir que reduciría la temperatura del sistema (**Cuadro 20.4**). Además de los cambios en el albedo, los cambios en el uso del suelo afectan la proporción de energía que es emitida como radiación de onda larga, calor sensible y calor latente. Los dos primeros flujos de energía tienen un efecto a escala local o cercano al punto donde se produce el cambio en el uso del suelo. El ca-

lor latente, en cambio, por tratarse de energía que es transportada en el vapor de agua, tendrá un efecto de liberar su energía en el lugar en que se produzca la condensación, que puede ser alejado del punto donde se produjo la evapotranspiración. La vegetación que posee raíces más profundas, como los bosques y plantaciones forestales, tiene la capacidad de absorber agua desde mayor profundidad en el perfil, lo que aumentaría la evapotranspiración y, por lo tanto, la relación calor latente/calor sensible respecto a pastizales o cultivos herbáceos. Finalmente, la rugosidad de la superficie o cobertura vegetal también afecta la relación calor latente/calor sensible. Las coberturas más altas y rugosas generan flujos turbulentos que aumentan la capacidad de transferir calor desde la superficie. Las coberturas más homogéneas, por el contrario, tienden a calentarse más porque se generan menos flujos turbulentos y la pérdida de energía se da mayormente por convección.

Cuadro 20.4. Valores medios de albedo de diferentes usos y coberturas del suelo.

Uso/cobertura del suelo	Albedo (%)
Bosques	10
Praderas	25
Praderas secas	30
Cultivos anuales	20
Suelo seco	25
Suelo húmedo	10
Agua (altura solar 5°)	40
Agua (altura solar 90°)	3
Nieve fresca	80
Nieve vieja	50

¿Qué son los bonos de carbono? (extraído de Gómez Lende, 2014)

El cambio climático planetario –también llamado ‘efecto invernadero’ o ‘calentamiento global’ comenzó a convertirse en objeto de preocupación internacional a partir de la segunda mitad del siglo XX; en 1979, la Primera Conferencia Mundial del Clima fue la señal de alerta generada desde la comunidad científica, alarma que impulsó la creación del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPPC) en 1988, vinculado al Programa de Naciones Unidas (ONU) para el Medio Ambiente (PNUMA). La ‘Cumbre de la Tierra’ de Río de Janeiro (Brasil), realizada en 1992, condujo luego a la fundación de la Convención Marco de la ONU sobre el Cambio Climático (UNFCCC), la cual desde entonces aglutina a 194 países, y cuya principal meta apunta a la estabilización de los niveles de concentración de los GEI en la atmósfera a través de la negociación de programas de reducción de emisiones por parte de los países signatarios.

Obteniendo un pobre resultado, los lineamientos acordados en la ‘Cumbre de la Tierra’ derivaron en la Tercera Conferencia de las Partes (COP-3) de la UNFCCC que, celebrada en 1997 en Kyoto (Japón), dio lugar al tratado homónimo, basado en la consecución de un objetivo global: reducir, durante el quinquenio 2008-2012, las emisiones de GEI un 5,2% respecto de los guarismos registrados en 1990. Se establecieron metas cuantitativas individuales obligatorias, con sanciones por incumplimiento, para los países industrializados con mayor contribución a dichas emisiones. Estos países están incluidos en el llamado “Anexo I”, y entre los cuales sobresalen los EE.UU. (36%), la Unión Europea (24%), Rusia (17,4%), Japón (8,5%), Australia (7%) y Canadá (3,3%).

Sin embargo, EE.UU. abogó por la introducción de ‘mecanismos de flexibilidad’ (“flex-mex”) que permitieran que los países industrializados que firmaban el tratado y no desearan reducir las emisiones de GEI en sus propios territorios intercambiaran estos compromisos por la promesa de rebajar las emisiones en otros países. En ese esquema, la insistencia en que cada país cumpliera individualmente con sus propios objetivos era suplantada por el énfasis en un equilibrio general regulado por la ‘mano invisible’ del mercado.

Suplementariamente a las políticas nacionales de reducción de emisiones de GEI, el Protocolo de Kyoto introdujo tres mecanismos para que los países centrales pudieran disminuir sus emisiones a bajo costo fuera de sus fronteras, promoviendo así el desarrollo de un mercado global de comercialización de créditos de carbono: el Comercio de Derechos de Emisión (CDE), la Implementación Conjunta (IC) y el Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL).

Si bien, EE.UU. había impuesto la adopción de los ‘mecanismos de flexibilidad’ como condición sine qua non para adoptar los compromisos de Kyoto, el gobierno norteamericano se retiró de las negociaciones en 2001, razón por la cual el tratado no pudo entrar en vigencia hasta 2005, cuando se produjo la adhesión de Rusia. No obstante, para entonces los mercados internacionales del carbono ya se hallaban en pleno funcionamiento, gracias a los Acuerdos de Bonn de 2001 y a la ratificación oficial del protocolo. También denominado ‘tope y trueque’ (“cap and trade”), el CDE es un mecanismo reservado sólo a los países del Anexo I, que permite a éstos y/o a sus empresas comerciar libremente unidades de los topes asignados, las cuales han sido calculados de acuerdo con sus niveles de emisiones de GEI. El Régimen Comunitario de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea (RCCDEUE) es el mercado “cap and trade” más antiguo e importante del mundo: allí, los gobiernos y los organismos intergubernamentales gozan de la potestad de distribuir gratuitamente (“grandfathering”) entre sus industrias ‘permisos de emisión’ –es decir, licencias para contaminar–, y a su vez aquellas posteriormente pueden, si lograron superar sus compromisos de reducción, vender los permisos excedentes a otras firmas que no hayan conseguido cumplir con sus obligaciones. Otros mercados similares, más pequeños, han surgido a partir de 2011 en Australia, Nueva Zelanda, EE.UU., Canadá, Japón, China, Corea del Sur, India, México, Brasil, Chile, Colombia y Costa Rica.

La IC, en cambio, autoriza a los países integrantes del Anexo I ejecutar, en los territorios de otros países industrializados –especialmente en los de Europa Oriental otrora pertenecientes a la Unión Soviética–, proyectos que reduzcan las emisiones o consigan la absorción de GEI, y así generar Unidades de Reducción de Emisiones (ERU) que coadyuven al cumplimiento de sus compromisos. El MDL, finalmente, alienta a los países industrializados a desarrollar proyectos de reducción y/o absorción de emisiones en naciones que no forman parte del Anexo I, y así obtener Reducciones de Emisiones Certificadas (CER), las cuales pueden ser libremente comercializadas para permitir el cumplimiento de las metas de Kyoto.

El comercio de carbono no es, en rigor, otra cosa que un experimento de creación de derechos de propiedad orientado a abaratar los costos de la reducción de emisiones de las corporaciones transnacionales: asignados según topes arbitrarios establecidos por países y organismos multilaterales permeables a las presiones de grupos de “lobby” empresariales y gobiernos, los derechos de contaminación son otorgados a firmas que detentan una repudiable trayectoria histórica en materia ambiental; al ser contabilizados en los balances de las empresas, esos permisos están protegidos por la ley, al igual que las patentes o las concesiones de tierras. Esto ha dado lugar a uno de los proyectos más regresivos de la historia en lo que atañe a la creación y distribución de derechos de propiedad (Gilbertson y Reyes, 2010; MCM y JS, 2011).

Bibliografía

- Álvarez, R., Santanatoglia, O., Daniel, P. y García, R. (1995a). Respiration and specific activity of soil microbial biomass under conventional and reduced tillage. *Pesq. Agrop. Bras*, 30: 701-709.
- Álvarez, R., Santanatoglia, O. y García, R. (1995b). Soil respiration, microbial biomass and organic matter contribution of crops in a wheat-soybean rotation. *Soil Use and Management*, 11: 45-50.
- Álvarez, R., Santanatoglia, O. y R. García (1996). Plant and microbial contribution to soil respiration under zero and disc tillage. *Eur. J. Soil Biol*, 32: 173-177.

- Álvarez, R., Russo, M., Prystupa, P., Sheinery, J. y Blotta, L. (1998). Soil carbon pools under conventional and no-tillage systems in the Argentine Rolling Pampa. *Agron. J.* 90: 138-143.
- Álvarez, R., Álvarez, C.R. y Lorenzo, G. (2001). Carbon dioxide fluxes following tillage from a Mollisol in the Argentine Rolling Pampa. *Eur. J. Soil Biol.* 37: 161-166.
- Álvarez, R. y Steinbach, H.S. (2010). Balance de carbono en agrosistemas. Ed: Álvarez, R., Rubio, G., Álvarez, C. R. y Lavado, R.S. (Eds.). En: Fertilidad de suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana. (pp. 203-216). Buenos Aires, Argentina: Editorial de la Facultad de Agronomía.
- Báez, S. y L. Cortizas. (2018). Incidencias ambientales a partir del avance de la producción de arroz en la provincia de Corrientes (Argentina) en las últimas décadas. V Jornadas Nacionales de Investigación en Geografía Argentina-XI Jornadas de Investigación y Extensión del Centro de Investigaciones Geográficas. Tandil, 16 al 19 de mayo 2018.
- Baird, C. y Cann, M. (2008). Environmental chemistry. W.H. USA: Freeman and Company. 775 pp.
- Bateman, E.J. y Baggs, E. M. (2005). Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. *Biol. Fertil. Soils*, 41: 379-388.
- Bedmar, E. J., Robles, E. F. y Delgado, M.J. (2005). The complete denitrification pathway of the symbiotic, nitrogen-fixing bacterium *Bradyrhizobium japonicum*. *Biochem. Soc. Trans.*, 33: 141-144.
- Bouwman, A. F., Boumans, L. J. M. y Batjes, N. H. (2002). Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: summary of available measurement data. *Global Biogeochem. Cycl.* 16: 6-1-6-13.
- Ciampitti, I. A., Ciarlo, E. A. y Conti, M. E. (2005). Emisiones de óxido nitroso en un cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merrill]: Efecto de la inoculación y de la fertilización nitrogenada. *Ciencia del Suelo*, 23: 123-131.
- Ciampitti, I.A., Ciarlo, E. A. y Conti, M. E. (2008). Nitrous oxide emissions from soil during soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] crop phenological stages and stubbles decomposition period. *Biol. Fertil. Soils*, 44: 581-588.
- Colangelo, C.H. (2003). Contaminación Ambiental: Análisis multidisciplinario. Argentina: Ediciones Praia. 530 pp.
- Cole, V. (1996). Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions. En: Watson, R. T., Zinyowera, M. C. y Moss, R.H. (Eds). Climate Change 1995 Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific Technical Analyses. (pp. 878). New York, USA: Cambridge University Press.
- Cosentino, V. R. N., Figueiro Aureggi, S. A. y Taboada, M. A. (2013). Hierarchy of factors driving N₂O emissions in non-tilled soils under different crops. *Eur. J. Soil Sci*, 64, 550-557. Doi: <https://doi.org/10.1111/ejss.12080>
- DeFries, R. S., Foley, J. A., y Asner, G. P. (2004). Land-use choices: balancing human needs and ecosystem function. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(5): 249-257.
- Del Grosso, S. J., Parton, W. J., Mosier, A.R., Walsh, M.K., Ojima, D.S. y Thornton, P.E. (2006). DAYCENT National-scale simulations of nitrous oxide emissions from cropped soils in the United States. *J. Environ. Qual.* 35: 1451-1460.
- Delgado, M.J., Casella, S. y Bedmar, E. J. (2007). Denitrification in rhizobia-legume symbiosis. En: Bothe, H., Ferguson, S. J. y Newton, W. E. (Eds.) *Biology of the nitrogen cycle*. (pp. 83-91). Amsterdam, Netherlands: Elsevier, ISBN 9780444528575.
- Dick, J., Skiba, U., Munro, R. y Deans, D. (2006). Effect of N-fixing and non N-fixing trees and crops on NO and N₂O emissions from Senegalese soils. *J. Biogeogr.* 33: 416-423.
- Dlugokencky, E. (2001). NOAA CMDL carbon cycle greenhouse gases, global average atmospheric methane mixing ratios. NOAA CMDL cooperative air sampling network. Recuperado de: <http://www.cmdl.noaa.gov/ccg/figures/ch4trend-global.gif>.
- Finster, L. (2014). Inventario de emisiones de GEI provenientes de la ganadería. En: Pascale Medina, C., Zubillaga, M. de las M., Taboada, M.A. (Eds.), Suelos, Producción Agropecuaria y Cambio Climático. Avances en la Argentina. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, Buenos Aires, Argentina.

- Firestone, M. K. (1982). Soil nitrogen budgets. En: Stevenson, F.J. (Ed.), Nitrogen in Agricultural Soils. Agron. Monogr. 22. American Society of Agronomy, CropScience Society of America. (pp. 289–326). Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America.
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C. *et al*, (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309: 570-574.
- Gasparri, N.I., Grau, H. R. y Manghi, E. (2008). Carbon pools and emissions from deforestation in Extra-Tropical Forest of Northern Argentina between 1900 and 2005. *Ecosystems*, 11: 1247-1261.
- Gilbertson, T. y Reyes, O. (2010). El mercado de emisiones: cómo funciona y por qué fracasa. México D. F.: Carbon Trade Watch. Recuperado de: http://www.carbontradewatch.org/downloads/publications/mercado_de_emisiones.pdf
- Gómez Lende, S. (2014). Orden global, orden racional: el protocolo de Kyoto, el mecanismo para un desarrollo limpio y los bonos de carbono, algunos ejemplos empíricos del caso argentino. *Revista de Geografía* (recife) ISSN: 0104-5490. e-ISSN: 2238-6211
- Gómez Lende, S. (2018). Destrucción de bosques nativos y deforestación ilegal. El caso argentino (1998-2016). *Papeles de Geografía*, 64: 154-180.
- Granli, T. y Bøckman, O. C. (1994). Nitrous oxide from agriculture. *Norwegian J. Agric. Sci.*, 128.
- Guo L. B. y Gifford, M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: a metanalysis. *Glob. Change Biol.*, 8: 345-360.
- Harrison, R. y Webb, J. (2001). A review of the effect of N fertilizer type on gaseousemissions. *Adv. Agron.*, 73: 65-108.
- Houghton, R. A. (2003). Revised estimates of annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000. *Tellus*, 55B: 378-390.
- Huang, Y., Zou, J. W., Zheng, X. H., Wang, Y. S. y Xu, X. K. (2004). Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios. *Soil Biol Biochem*, 36: 973-981.
- Hunter, M. (1996). *Fundamentals of Conservation Biology*. USA: Blackwell Science, Inc..
- Hulshoff, M. R. (1995). Landscape indices describing a Dutch landscape. *Landscape Ecology*, 10: 101-111.
- International Fertilizer Association/Food and Agriculture Organization-IFA/FAO. (2001). Global Estimates of Gaseous Emissions of NH₃, NO, and N₂O from Agricultural Land. International Fertilizer Industry Association and the Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy 106 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC. (1996). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual. Intergovernmental Panel on Climate Change. Suiza. 76 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC. (2006). Guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4. Agriculture, forestry and other land use.
- Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC. (2008). Cambio climático 2007. Informe de síntesis. En: Pachouri, R.K. y A. Reisinger (Eds.). Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Suecia. 103 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis Summary for Policymakers, IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304: 1623–1627
- Lauenroth, W.K.; I.C. Burke y J.M. Paruelo. (2000). Patterns of production and precipitation us efficiency of winter wheat and native grasslands in the central great plains of the United States. *Ecosystems*, 3: 334-351.
- Lobos, G.A., Vallejos, O. B., Caroca, C. J. y Marchant, C. C. (2005). El mercado de los bonos de carbono (“bonos verdes”): una revisión. *Revista Interamericana de Ambiente y Turismo*, 1: 42-52.
- Marchetti, M., Campaiola, F., Lozupone, G. y Tosi, G. (1998). Forest Clearings, Margins and Mixed Area Survey for Diversity Assessment in the Ligurian Inventory (Northern Italy). En: Bachmann, P., Köhl, M. y Päivinen, R. (Eds.). Assessment of Biodiversity for Improved Forest Planning. *Proceedings*, European Forest Institute Proceedings n° 18. (pp. 291-300). Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Marea Creciente México y Jubilee South (MCMJS). (2011). Los mitos del mercado de carbono. México D. F.: Marea Creciente México y Jubilee South.

- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca-MINAGRI-SayDS. (2015): Segundo reporte de Argentina al Proceso de Montreal. Reporte Nacional con base a los criterios e indicadores del Proceso de Montreal. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Agroindustria-Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 188 pp.
- Nayak, D. R., Adhya, T. K., Babu, Y. J., Datta, A., Ramakrishnan, B. y Rao, V.R. (2006). Methane emission from a flooded field of Eastern India as influenced by planting date and age (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Agric Ecosyst. Environ.*, 115: 79-87.
- Neue, H. U. (1993). Methane emission from rice field. *BioScience*.43: 446-474.
- Neue, H. U., Lantin, R. L., Alberto, M. C. R., Aduna, J. B., Javellana, M. A. y Wassmann, R. (1996). Factors affecting methane emission from Rice fields. *Atmos. Environ.*, 30: 1751-1754.
- Nouchi, I., Mariko, S. y Aoki, K. (1990). Mechanism of methane transport from the rizosphere to the atmosphere through rice plants. *Plant Physiol.*, 94: 59-66.
- Norton, J. M. (2008). Nitrification in agricultural soils. En: Schepers, J. S. y Raun, W.R. (Eds.), *Nitrogen in Agricultural Systems*. Agron. Monogr. 49. (pp. 173-199). Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- O'Hara, W. y Daniel, R. M. (1985). Rhizobial denitrification: a review. *Soil BiolBiochem*, 17: 1-9.
- World Meteorological Organization-OMM. (2018). Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero. Recuperado de: <https://public.wmo.int/en/resources/library/wmo-greenhouse-gas-bulletin>.
- World Meteorological Organization-OMM. (2019). Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero. Recuperado de: <https://public.wmo.int/en/resources/library/wmo-greenhouse-gas-bulletin>.
- Okada, N., Nomura, N., Nakajima-Kambe, T. y Uchiyama, H. (2005). Characterization of the aerobic denitrification in *Mesorhizobium* sp. strain NH-14 in comparison with that in related rhizobia. *Microbes Environ*, 20: 208-215.
- Orozco Berrenetxea C., Pérez Semano, A., González del Prado, M. N., Rodríguez Vidal, F. y Alfayate Blanco, J. (2004). *Contaminación atmosférica, una visión desde la química*. (pp. 682). Madrid, España: Editorial Thomson.
- Park, S., Croteau, P., Boering, K. A., Etheridge, D. M., Ferretti, D., Fraser, P.J., Kim, K.-R., Krummel, P.B., Langenfelds *et al.* (2012). Trends and seasonal cycles in the isotopic composition of nitrous oxide since 1940. *Nat. Geosci.*, 5: 261-265. Doi: <https://doi.org/10.1038/ngeo1421>
- Parkin, T. B. y Kaspar, T. C. (2006). Nitrous oxide emissions from corn-soybean systems in the Midwest. *J. Environ. Qual.*, 35: 1496-1506.
- Pielke, R. A., Marland, G., Betts, R. A., Chase, T. N., Eastman, J. L., Niles, J. L., Niyogi, D. D. S. y Running, S. W. (2002). The influence of land-use changes and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, 360: 1705-1719.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente-PNUMA. (2005). Productos químicos. Emisiones de dioxinas y furanos por quema incontrolada de biomasa. Esta publicación se ha producido dentro del marco del Programa Interinstitucional para el Manejo Adecuado de los Productos Químicos (IOMC).
- Ravishankara, A. R., Daniel, J. S. y Portmann, R. W. (2009). Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, 326: 123-125.
- Repetto, R. (1988). The extent and rate of deforestation. En: Repetto, R. y Gillis, M. (Eds.). *Public Policies and the Misuse of Forest Resources*. (pp. 2-15). USA: World Resources Institute. Cambridge University Press.
- Ritchie, G. y Nicholas, D. (1972). Identification of the sources of nitrous oxide produced by oxidative and reductive processes in *Nitrosomonas europaea*. *Biochemistry J.*, 126: 1181-1191.
- Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H.E. y Picone, L. I. (2001). Denitrification in maize under no-tillage: effect of nitrogen rate and application time. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1314-1323.
- Sala, O. E., Chapin, F. S., Armesto, J. J., Berlow Bloomfield, E., Dirzo, R., Huber-Sanwald, E., Huenneke, L. F., Jackson, R., Kinzig, A. *et al.* (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287: 1770-1774.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable-SAYDS. (2005) Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos. Informe nacional. (pp. 126). Buenos Aires, Argentina: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.

- Schmidt, M. A. (2015). Política ambiental, avance de la frontera agropecuaria y deforestación en Argentina: el caso de la ley 'De Bosques'. *Revista Geo Pantanal*, 18: 121-139.
- Skole, D. y C. Tucker (1993). Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. *Science*, 260: 1905-1910.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., Mara, F. O., Rice, C., Scholes, B. y Sirotenko, O. (2007). Agriculture. En: Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R. y Meyer, L. A. (Eds). *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Snyder, C.S., Brulsema, T. W., Jensen, T. L. y Fixen, P. E. (2009). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agric. Ecosys. Environ.*, 133: 247-266.
- Stiling, P. (1996). *Ecology. Theories and Applications*. New Jersey, USA: Prentice-Hall.
- Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L. y Fixen, P. E. (2009). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 133: 247-266.
- Taboada, M. A. y Cosentino, V. R. N. (2011). Emisiones de gases con efecto invernadero provenientes de la agricultura. Estado actual del conocimiento del mundo y en Argentina. Simposio Fertilidad 2011. *IPNI*, 55-68 p.
- Tian, H., Xu, R., Canadell, J. G., Thompson, R. L. y Winierter, W. (2020). A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, 586: 248-256.
- Venterea, R. T. y Stanenas, A. J. (2008). Profile analysis modeling and modeling of reduced tillage effects on soil nitrous oxide flux. *J. Environ. Qual.*, 37: 1360-1367
- Viglizzo, E. F. (2010). El avance de la frontera agropecuaria y el stock de nutrientes (C, N y P) en los Ecosistemas. En: Viglizzo, E. F. y Jobbágy, E. (Eds.). *Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental*. Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA 23-35 p.
- Viglizzo, E. F., Carreño, L. V., Pereyra, H., Ricard, F., Clatt, J. y Pincén, D. (2010). Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico. En: Viglizzo, E. F. y Jobbágy, E. (Eds.). *Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental*. Buenos Aires, Argentina: Ediciones INTA. 9-16 p.
- Viglizzo E. F., Frank, F. C., Carreño, L. V., Jobbágy, E. G., Pereyra, H., Clattz, J., Pincé, D. y Ricar, M. F. (2011). Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology*, 17: 959-973.
- Von Bernard, H., Vilarinoy, V. y Piñeiro G. (2007). Emisión de metano en tres sistemas de invernada para engorde de ganado en Argentina. *Ciencia e investigación agraria*. 34: 121-129.
- World Health Organization. (1987). Regional Office for Europe. Dioxins and furans from municipal incinerators. Copenhagen.
- WMO, 2019. World Meteorological Organization. Greenhouse gas bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018, WMO Greenhouse gas bulletin.
- Zhong, Z., Lemke, R.L. y Nelson, L. M. (2009). Nitrous oxide emissions associated with nitrogen fixation by grain legumes. *Soil Biol. Biochemi*, 41: 2283-2291.
- Zubillaga, M. de las M. y Rimski Korsakov, H. (2014). Fertilización nitrogenada y gases de efecto invernadero en cultivos extensivos de agroecosistemas pampeanos, en: Pascale Medina, C., Zubillaga, M. de las M., Taboada, M.A. (Eds.), *Suelos, Producción Agropecuaria y Cambio Climático. Avances en la Argentina*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, Buenos Aires, Argentina.