

Flujos de gases y compuestos de efecto invernadero en México en décadas recientes (2000-2019)

Guillermo N. Murray Tortarolo, Kevin Perea, Alma Mendoza, Víctor J. Jaramillo, Fabiola Murguía-Flores, Amparo Martínez, Miguel Ángel García García, Rodrigo Vargas.

Introducción

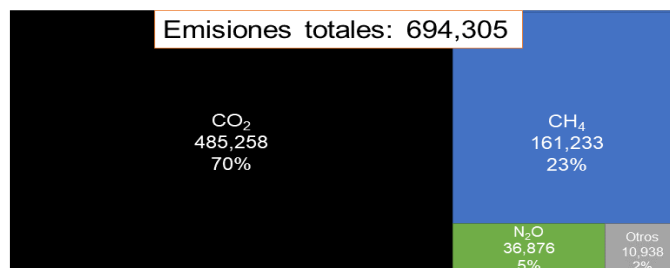
Se presenta un panorama de las emisiones y sumideros de gases y compuestos de efecto invernadero (GYCEI) (dióxido de carbono [CO₂], metano [CH₄], óxido nitroso [N₂O] y compuestos) que abarca las últimas dos décadas (2000-2019). Para ello, se comparan los datos del Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Invernadero (INEGYCEI), los provenientes de mediciones independientes (satélites, torres de flujo, modelos) y los que aparecen en la literatura científica. A partir de esta comparación se identifican discrepancias críticas entre las fuentes de información, así como faltantes claves para fortalecer las estimaciones. Diferencias en enfoques metodológicos, criterios y formas de reporte, podrían entrar entre las causas.

Contexto

En las últimas dos décadas (2000-2019) las emisiones totales de GYCEI de nuestra nación ascendieron a 694,305.6 Gg CO₂e año⁻¹ en promedio, de acuerdo con los datos del Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Invernadero (INEGYCEI). De éstas, el 23% fue reincorporado por los ecosistemas terrestres, correspondiendo a -165,605 Gg CO₂e año⁻¹. De las emisiones totales restantes, la partición por gas revela que el 70% corresponde a CO₂ con 485,258 Gg CO₂e año⁻¹, seguidas del CH₄ con 161,233 Gg CO₂e año⁻¹, y en tercer lugar el N₂O con 36,876 Gg CO₂e año⁻¹. Dentro de los componentes de vida corta, destacan las emisiones de Freón 134A (o HFC-134A) con 3,923.2 Gg CO₂e año⁻¹ y de Freón 404A (o HFC-404A) con 3767.8 Gg CO₂e año⁻¹, mientras que para el caso del Carbono Negro (CN) en el periodo se estiman emisiones de 76.88 Gg (véase **Figura 1**). No obstante, existen discrepancias entre los valores reportados por el INEGYCEI, la literatura especializada y los derivados de productos de mediciones globales independientes (p.ej. satélites o torres de flujo), así como faltantes críticos de información. Discernir la naturaleza de las discrepancias y cubrir la falta de

información son esenciales para guiar la investigación científica futura y la correcta toma de decisiones en torno a la mitigación de las emisiones de GYCEI.

Figura 1: Balance anual promedio de emisiones de GYCEI en México de 2000-2019.



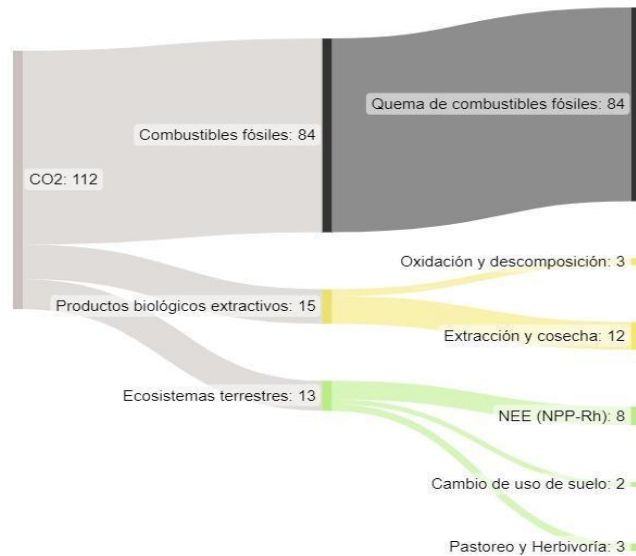
Todas las unidades se encuentran presentadas en Gg CO₂e año⁻¹.

Fuente: elaboración propia con datos del INEGYCEI.

El flujo de emisiones de CO₂ más importante a la atmósfera es la quema de combustibles fósiles. Para este gas existe una amplia coincidencia entre las estimaciones provenientes de diferentes fuentes, y su flujo es el más estudiado.

La emisión de CO₂ por la quema de combustibles fósiles es el flujo más estudiado y reportado en la literatura (véase **Figura 3**) y para el cual existen las menores discrepancias entre los distintos productos (véase **Tabla 1**). Es decir, la consistencia de las estimaciones derivadas de los datos del inventario nacional, las mediciones directas en la atmósfera y las mediciones independientes otorgan mucha confiabilidad al valor anual promedio de 460 Tg CO₂e año⁻¹ para las últimas dos décadas.

Figura 2: Artículos con datos reportados para flujos de CO₂ a nivel nacional o regional.



Los números representan el número de artículos que reportan cada flujo.
Fuente: Elaboración propia

El segundo flujo de mayor importancia es el sumidero de CO₂ de los sectores Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU por sus siglas en inglés). No obstante, las discrepancias entre las estimaciones de este flujo son de un orden de magnitud.

En el caso del del sector AFOLU existen enormes discrepancias entre las estimaciones (véase **Tabla 1**). El inventario nacional estima que los ecosistemas de México han captado un promedio de -165 Tg CO₂e por año durante las últimas dos décadas, o el equivalente al 36% de todas las emisiones de dióxido de carbono por la quema de combustibles fósiles. Esta estimación proviene de un valor de 209 Tg CO₂e de todas las tierras que no son modificadas (p.ej. bosques que permanecen como bosques), al que se suma una ganancia de -4.4 Tg CO₂e debidas a la extracción y la cosecha de la madera, con pérdidas relevantes debidas al cambio de uso del suelo equivalentes a 16.5 Tg CO₂e, la quema de biomasa con 28 Tg CO₂e y la oxidación y descomposición de residuos por 3 Tg CO₂e . En contraste, los datos provenientes de productos globales estiman que México ha sido un sumidero pequeño de C en las últimas dos décadas, con un valor de sólo -35 Tg CO₂e, y que en ciertos años se vuelve una fuente. La estimación de México como un sumidero menor es consistente entre los datos de los modelos globales (TrendyV9), los de modelos de inversiones atmosféricas, lo estimado en el Global Carbon Budget 2020 y los

datos satelitales y torres de flujo. Identificar el origen de estas discrepancias para tener una estimación confiable es posiblemente la prioridad más importante de investigación entre los faltantes de información de GYCEI en México y de importancia crítica para la correcta dirección de la política pública nacional de mitigación.

Tabla 1: Comparación entre los flujos de CO₂ reportados por el Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero y los de diversos productos independientes de mediciones globales (periodo 2000-2019).

| Gg CO ₂ e | Flujo | INGYCEI | Productos Globales |
|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Combustibles fósiles | Quema de combustibles fósiles | 434,117 ± 42,414 | 456,104 ± 23,584 ¹ |
| | Emisiones de cemento | 17,335 ± 1,957 | - |
| | Descomposición de plástico | - | - |
| | Carbonatación | - | - |
| Ecosistemas Terrestres | NEE (NPP-Rh) | -209,292 ± 4,650 | -101,130 ± 66,180 ² |
| | Cambio de uso del suelo | 16,440 ± 1,466 | 22,158 ± 8,163 ³ |
| | Disturbio (p.ej. fuego) | - | 6,199 ± 9,511 ⁴ |
| | Pastoreo y Herbivoría | - | 13,511 ⁵ |
| Extracción de productos biológicos | Oxidación y descomposición | 3,080 ± 1116 | 6,875 ⁵ |
| | Quema de biomasa | 28,804 ± 2,639 | 12,600 ⁷ |
| | Extracción y cosecha | -4,367 ± 4,662 | 17,287 ⁵ |
| TOTAL AFOLU | | -165,605 ± 9,231 | -35,130 ± 46,180 ⁶ |

¹GridFed, GCP2020, EdgarV6, CEDS, CT2018, ²TrendyV9, ³TrendyV9, Bookeeping, ⁴GFED, Trendy V9, ⁵TrendyV9, ⁶Atmospheric Inversions GCP2020, Trendyv9, Bookeeping y Fluxcom. ⁷Serrano-Medrano et al. 2018.

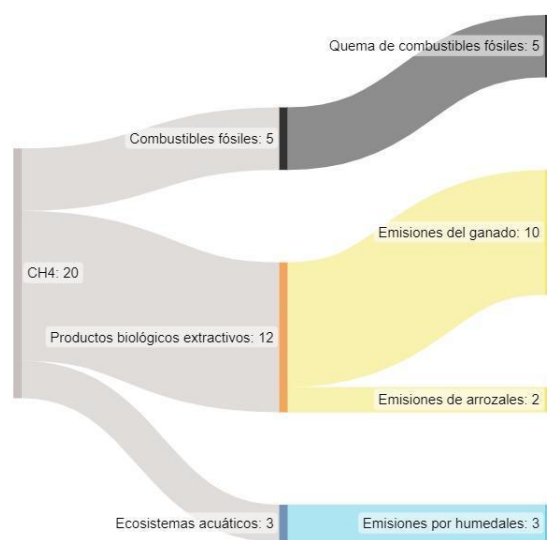
Fuente: elaboración propia

El flujo de CH₄ más importante a la atmósfera proviene del sector AFOLU, para el cual existe una alta coincidencia entre las distintas estimaciones, y es además el más estudiado.

El 82% de las emisiones de CH₄ proviene del sector AFOLU, particularmente de la ganadería. El total estimado promedio de emisiones de este sector es de 131 Tg CO₂e por año en el inventario nacional y de 145 Tg CO₂e anuales en los productos globales. La partición de los flujos de AFOLU indica que las principales emisiones provienen de la ganadería con un valor promedio entre el inventario y las estimaciones globales de 70 Tg

CO₂e por año, flujo que también es el más estudiado en la literatura (véase **Figura 3**). La descomposición de residuos se encuentra en segundo lugar, para la que el inventario nacional estima un valor de 38 Tg CO₂e por año, mientras que los productos globales la sitúan en 50 Tg CO₂e. Para las emisiones agrícolas (incluyendo arrozales, extracción y manejo de estiércol) los valores son similares entre sí, con un estimado del inventario de 17 Tg CO₂e y de 21 Tg CO₂e de los productos globales (véase **Tabla 2**).

Figura 3 Artículos con datos reportados para flujos de CH₄ a nivel nacional o regional.



Los números representan el número de artículos que reportan cada flujo en particular.

Fuente: Elaboración propia

Los flujos de CH₄ provenientes de los humedales naturales, del consumo de metano en el suelo y de la quema de biomasa no se encuentran reportados ni en el INGYCEI ni en la literatura.

Existe un faltante crítico de información en torno a las emisiones provenientes de los humedales que en la actualidad se estiman en 6 Tg CO₂e de la quema de biomasa en estufas (3 Tg CO₂e) y del consumo del compuesto en el suelo (-2 Tg CO₂e), mismas que provienen únicamente de modelos matemáticos globales, pero que no han sido estudiadas ni reportadas a nivel país.

El segundo flujo más importante de CH₄ es la quema de combustibles fósiles, para el que existe coincidencia entre las estimaciones.

A diferencia del CO₂, este flujo representa una fracción menor con un 18% de la contribución a las emisiones totales. Nuevamente, existe coincidencia entre los datos del inventario nacional y los reportados por los productos globales, con un estimado de emisiones de 28 Tg CO₂e anual en promedio durante las últimas dos décadas (véase **Tabla 2**).

Tabla 2: Comparación entre los flujos de CH₄ reportados por el Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero y los de diversos productos independientes de mediciones globales.

| Gg CO ₂ e | Flujo | INGYCEI | Productos Globales |
|------------------------------------|---|-------------------------|------------------------------|
| Combustibles fósiles | Quema de combustibles fósiles | 28,667 ± 7,526 | 28,336 ± 10,025 ¹ |
| Ecosistemas Terrestres | Oxidación en el suelo | - | -1632 ± 452 ² |
| | Fuego | 1,189±516 | 1408 ± 905 ³ |
| | Emisiones naturales (p.ej. termitas) | - | - |
| Extracción de productos biológicos | Emisiones del ganado | 75,531 ± 3,276 | 65,036 ± 11,656 ³ |
| | Quema de biomasa | - | 2,900 ± 1,250 ⁶ |
| | Emisiones agrícolas (arrozales), extracción y cosecha (incluye estiércol) | 17,556 ± 1,128 | 21,024 ± 3,530 ³ |
| | Descomposición de residuos | 38,076±8,688 | 50,241 ± 8,263 ¹ |
| Ecosistemas acuáticos | Emisión por humedales | - | 6080 ± 2,715 ^{4,5} |
| Total AFOLU | | 131,163 ± 33,492 | 145,057 ± 46,587 |

¹ GCP2020, EdgarV6, CEDS, CT2018, ²GCP2020, MeMo V1.1 ³GCP2020,⁴GCP2020, ⁵Murguía-Flores datos no publicados, ⁶Serran-Medrano et al. 2018.

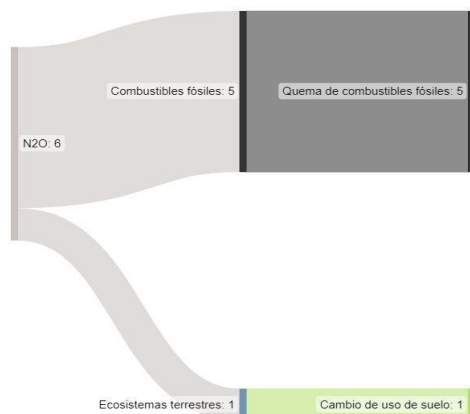
Fuente: elaboración propia

El flujo de N₂O más importante proviene del sector AFOLU y las estimaciones de diferentes fuentes coinciden. No obstante, no existen trabajos reportados en la literatura científica.

El caso del óxido nitroso es similar al del metano, con la mayor parte de las emisiones concentradas en el sector AFOLU. En particular, la oxidación de los fertilizantes inorgánicos y la emisión resultante de este gas representa casi la totalidad de las emisiones (véase

Tabla 3). Las estimaciones del inventario nacional en su último reporte y de los productos globales coinciden en magnitud, con un valor aproximado de 30 Tg CO₂e por año. No obstante, este flujo no ha sido reportado en la literatura científica (véase **Figura 4**).

Figura 4 Artículos con datos reportados para flujos de N₂O a nivel nacional o regional.



Los números representan el número de artículos que reportan cada flujo en particular.

Fuente: elaboración propia

Las emisiones de N₂O debidas a la quema de combustibles son un componente menor del flujo, pero las estimaciones discrepan.

Las mayores discrepancias en las estimaciones de los flujos de este compuesto se encuentran en las emisiones por combustibles fósiles: los productos globales estiman el doble de los valores del inventario (véase **Tabla 3**).

Tabla 3 Comparación entre los flujos de N₂O provenientes del inventario nacional de gases y compuestos de efecto invernadero y diversos productos independientes de mediciones globales.

| Gg CO ₂ -eq | Flujo | INGYCEI | Productos Globales ¹ |
|------------------------------------|-------------------------------|----------------|---------------------------------|
| Combustibles fósiles | Quema de combustibles fósiles | 3,292 ± 403 | 7,669 ± 1,061 |
| Ecosistemas Terrestres | Fuego | 252 ± 64 | 250 ± 59 |
| | Cambio de Uso de Suelo | - | 922 ± 550 |
| Extracción de productos biológicos | Oxidación | 29,315 ± 5,043 | 31,335 ± 7,800 |
| | Quema de biomasa | 194 ± 62 | 160 ± 40 |
| Aguas continentales | Desgasificación | - | - |

| | | | |
|-------------|--|---------------|---------------|
| TOTAL AFOLU | | 29,762 ± 5050 | 32,667 ± 7952 |
|-------------|--|---------------|---------------|

¹Todos los datos provienen del Global N₂O Budget y Deng et al. 2022.

Fuente: Elaboración propia.

Aunque los flujos de carbono negro (CN) son de menor magnitud que los demás GYCEI, su importancia destaca en las grandes ciudades por su impacto en la salud humana.

El promedio de las emisiones del CN en México, para el periodo de estudio, se estiman en 76.88 Gg. De estas emisiones, el flujo más importante son las que provienen de la quema de combustibles fósiles 90%, mientras que; el 8% proviene del sector AFOLU y el 2% de los residuos (véase **Tabla 4**). En CN los estudios reportan las emisiones sobre la calidad del aire en zonas urbanas (50%), el uso de leña como energía (19%) y transporte (13%). El 44% de las investigaciones son de carácter regional considerando a las zonas metropolitanas de la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey; mientras que, el 19% reportan estimaciones a nivel país utilizando ecuaciones por proporciones. Dentro de las técnicas de estimación se utilizan nueve entre las cuales destacan el extintómetro fotóacústico (25%) y por correlación (19%).

Al respecto de la segunda fuente de emisión (AFOLU), se identificó un solo estudio que refleja las emisiones provenientes de los incendios forestales en el periodo 2000-2012 y el promedio de dicho periodo es similar a los datos del INEGYCEI. Finalmente es importante destacar que a diferencia de las emisiones de GEI no se encontraron productos globales para este tipo de contaminantes y que solo se identificó un estudio con una estimación que incluyera todas las fuentes del país, el cual reporta un rango de emisiones entre los 62 y 89 Gg (2000-2012).

Tabla 4 Comparación entre los flujos de CN provenientes del inventario nacional de gases y compuestos de efecto invernadero y productos independientes.

| Gg CN | Flujo | INGYCEI | Productos Globales |
|------------------------|-------------------------------|--------------|--------------------|
| Combustibles fósiles | Quema de combustibles fósiles | 68.86 ± 8.10 | |
| Ecosistemas Terrestres | Disturbio (p.ej. fuego) | 1.85 ± 1.24 | |
| Extracción de | Quema de biomasa | 3.58 ± 0.37 | 5.9 ± 4.2 |

| | | | |
|---------------------------|--|---------------------|--------|
| productos biológicos | | | |
| Total AFOLU | | 6.40 ± 2,15 | |
| Total emisiones CN | | 76.88 ± 8.89 | 62-89* |

Fuente: Elaboración propia

Perspectivas: Necesidades de información actuales y futuras

1. **Emisiones por combustibles fósiles:** en general existe una coincidencia muy alta entre las diferentes aproximaciones y son también los datos más reportados en la literatura. La única discrepancia notable, que por lo tanto merece ser estudiada, se encuentra en el óxido nitroso, para el que los productos globales estiman el doble de emisiones que el inventario nacional. Adicionalmente, resaltamos la falta de datos sobre las emisiones procedentes de la descomposición de plásticos y la carbonatación del cemento -que si bien pueden ser flujos menores- son fundamentales en las estimaciones del balance total nacional.
2. **Ecosistemas acuáticos:** tal vez el faltante de información más importante en las estimaciones del inventario, de los productos globales y de la literatura es sobre los flujos de carbono que se mueven a través del agua. De acuerdo con nuestra revisión, no existen estimaciones para las emisiones de GYCEI provenientes de cuerpos de agua a través de procesos como la desgasificación, la metanogénesis o las salidas al océano. El transporte y las pérdidas a través de cuerpos de agua (también conocido como transporte lateral) han recibido cada vez más atención de la ciencia internacional y han sido reconocidos como una salida fundamental de GYCEI en todos los sistemas tropicales.
3. **Ecosistemas terrestres:** las principales emisiones de este almacén provienen de los incendios y el cambio de uso del suelo, pero se tiene muy poca información a nivel nacional y las discrepancias entre las estimaciones son sumamente altas. Claramente, constituyen dos prioridades de estudio para reducir la incertidumbre en las mismas. No obstante, la mayor discrepancia ocurre en los valores del intercambio de carbono neto de los ecosistemas conservados. Las estimaciones del inventario nacional son del doble que las estimadas por los modelos, lo que representa una discrepancia de un orden de

magnitud en el carbono que capturan los ecosistemas terrestres de México. La reconciliación de estos valores debe ser una tarea primordial, pues las decisiones de mitigación pueden variar ampliamente en función de los mismos. En particular, consideramos que se debe hacer un esfuerzo por estimar el intercambio neto de carbono basado en los valores de los flujos, más que en estimaciones de cambio en la biomasa vegetal o de la cobertura de la misma, que además conlleva incertidumbre de medición alta.

4. **Productos biológicos extractivos:** los valores de la mayoría de los flujos asociados a la extracción de productos biológicos (alimentos, madera, telas, etc.) y la descomposición de los mismos, coincide entre las diferentes aproximaciones. La diferencia más notable es la extracción y cosecha en el caso del dióxido de carbono. Los datos del inventario nacional asumen que el carbono extraído de la madera y los cultivos es un sumidero neto en el país, mientras que los productos globales lo estiman como una pérdida. Será fundamental reconciliar lo que representan, los valores de las estimaciones y aumentar el número de estudios sobre los mismos.
5. **Flujos laterales:** este tipo de entradas y salidas de GYCEI del país son prácticamente inexistentes en la literatura científica, el inventario y las estimaciones de productos globales. Entre los faltantes se encuentran el comercio de plásticos, combustibles, madera, productos agroalimentarios y las salidas al océano. La estimación de los mismos será fundamental para contar con un panorama completo del balance de los GYCEI en México y para dirigir acciones de mitigación.
6. Finalmente, también hacemos notar el desbalance en la atención que se ha prestado al estudio del dióxido de carbono en comparación con el metano y el óxido nitroso. De la totalidad de los artículos científicos encontrados, sólo el 14% corresponden al metano, el 6% al carbono negro y el 5% al óxido nitroso. Si bien es necesario promover esfuerzos para el estudio de todos los GYCEI a escala nacional y regional, se debe prestar particular atención a los procesos y compuestos menos estudiados. En particular, los estudios sobre flujos como el consumo de metano por el suelo, las emisiones de metano por humedales,

las emisiones de óxido nítrico por la oxidación de fertilizantes y todos los flujos relacionados con los incendios son escasos.

Referencias

- Bookkeeping. Houghton, R. A., House, J. I., Pongratz, J., Van Der Werf, G. R., Defries, R. S., Hansen, M. C., ... & Ramankutty, N. (2012). Carbon emissions from land use and land-cover change. *Biogeosciences*, 9(12), 5125-5142. <https://doi.org/10.5194/bg-9-5125-2012>
- Bookkeeping. Gasser, T., Crepin, L., Quilcaille, Y., Houghton, R. A., Ciais, P., & Obersteiner, M. (2020). Historical CO₂ emissions from land use and land cover change and their uncertainty. *Biogeosciences*, 17(15), 4075-4101. <https://doi.org/10.5194/bg-17-4075-2020>
- CEDS. HOESLY, Rachel M., et al. Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS). *Geoscientific Model Development*, 2018, vol. 11, no 1, p. 369-408. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-369-2018>
- CT2018. Peters, W., Jacobson, A. R., Sweeney, C., Andrews, A. E., Conway, T. J., Masarie, K., ... & Tans, P. P. (2007). An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(48), 18925-18930. <https://doi.org/10.1073/pnas.0708986104>
- Deng, Z., Ciais, P., Tzompa-Sosa, Z. A., Saunio, M., Qiu, C., Tan, C., ... & Chevallier, F. (2022). Comparing national greenhouse gas budgets reported in UNFCCC inventories against atmospheric inversions. *Earth System Science Data*, 14(4), 1639-1675. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1639-2022>
- EDGAR v6.0 <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>
- FLUXCOM. Jung, M., Koirala, S., Weber, U., Ichii, K., Gans, F., Camps-Valls, G., ... & Reichstein, M. (2019). The FLUXCOM ensemble of global land-atmosphere energy fluxes. *Scientific data*, 6(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0076-8>
- GCP, 2020. Friedlingstein, P., O'sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., ... & Zaehle, S. (2020). Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4), 3269-3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- INGYCEI. <https://www.gob.mx/inecc/documentos/investigaciones-2018-2013-en-materia-de-mitigacion-del-cambio-climatico>
- Murguía-Flores, F., Arndt, S., Ganesan, A. L., Murray-Tortarolo, G., & Hornibrook, E. R. (2018). Soil Methanotrophy Model (MeMo v1. 0): a process-based model to quantify global uptake of atmospheric methane by soil. *Geoscientific Model Development*, 11(6), 2009-2032. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2009-2018>
- Serrano-Medrano, M., García-Bustamante, C., Berrueta, V. M., Martínez-Bravo, R., Ruiz-García, V. M., Ghilardi, A., & Masera, O. (2018). Promoting LPG, clean woodburning cookstoves or both? Climate change mitigation implications of integrated household energy transition scenarios in rural Mexico. *Environmental*

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aad5b8/meta>

- Tian, H., Xu, R., Canadell, J. G., Thompson, R. L., Winiwarter, W., Suntharalingam, P., ... & Yao, Y. (2020). A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, 586(7828), 248-256. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>
- Trendy^{v9}. Sitch, S., Friedlingstein, P., Gruber, N., Jones, S. D., Murray-Tortarolo, G., Ahlström, A., ... & Myneni, R. (2015). Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide. *Biogeosciences*, 12(3), 653-679. <https://doi.org/10.5194/bg-12-653-2015>