



Facultad
de Ciencias
Exactas



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

Trabajo Final de la Licenciatura en Química y Tecnología Ambiental

Evaluación de los niveles de metano en zona de producción petrolera mediante el uso de imágenes satelitales bajo el enfoque de la ciencia de datos

Corina Sanucci

Director: Dr. Andrés Porta. CIM, CONICET-UNLP

Co-directora: Dra. Soledad Represa. FCAG, UNLP

La Plata, 2021

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin el sistema educativo público y gratuito de nuestro país. Agradezco a las excelentes instituciones que me acogieron durante mi pasaje por esta carrera: la Facultad de Ciencias Exactas y la Facultad de Ciencias Naturales y Museo, de la Universidad Nacional de La Plata, y el Centro de Investigaciones del Medioambiente (CIM), UNLP-CONICET.

A los docentes de la Licenciatura en Química Y Tecnología Ambiental, que me transmitieron no solo conocimientos, sino también pasión y compromiso por la salud ambiental y humana, comprendidas como partes de un todo indisoluble.

A mi director, Andrés, por tu apoyo para realizar este trabajo desde el momento cero, el aguante infinito y la buena predisposición, ante todo. A Sol, mi codirectora, ¡por ayudarme a salir adelante con tus aportes y guía constante! Gracias a ambos aprendí muchísimo sobre el proceso y la organización necesarios para llevar adelante trabajos académicos y científicos.

A las docentes de la cátedra de Sensores Remotos, por los conocimientos brindados con tanta calidez.

Al Dr. Günter Lichtenberg, del Centro Aeroespacial Alemán, por la maravillosa predisposición para responder mis consultas sobre los datos de SCIAMACHY. A Sander Niemeijer, de S(&)T Corporation, por colaborar conmigo y responder mis dudas a la hora de utilizar HARP para procesar los datos satelitales.

A mis amigas y amigos de la Facultad, por las hermosas horas compartidas entre mates y cursadas. Son el mejor grupo que pude haber tenido, siempre colaborando desde el compañerismo. En especial, a Ani, Rocío, Mel, Maca y Leda. ¡Por las infinitas horas de estudio juntas! Y por ayudarme a mantener la fuerza de voluntad en los momentos difíciles.

A Agus, por tu inmenso apoyo en el día a día, tus cuidados amorosos y tu aguante en los momentos de locura. Gracias por los desayunos, los mates, los paseos, las mil comidas deliciosas, las charlas y ¡las aventuras por venir!

A mi familia, por festejar conmigo este logro y por todo el apoyo. A mi mamá y papá, quienes siempre me enseñaron y enseñan a ser yo misma.

Índice de contenidos

1.	Introducción	5
2.	Objetivos	8
	Objetivo general	9
	Objetivos específicos	9
3.	Marco Teórico	10
	3.1. Cambio climático y proyecciones en Argentina	11
	3.2. El CH₄ como gas de efecto invernadero.	15
	3.3. Distribución global del CH₄	18
	3.4. Sumideros de CH₄	19
	3.5. Fuentes de CH₄	20
	3.6. Emisiones de CH₄ de la industria de gas y petróleo	21
	3.7. Control de las emisiones de CH₄	23
	3.8. Fundamentos de la teledetección atmosférica	24
	3.8.1. Productos satelitales y algoritmos de recuperación	28
	3.8.2. Unidades empleadas en teledetección atmosférica	29
4.	Materiales y métodos	30
	4.1. Área de estudio	31
	4.2. Fuentes de datos analizadas	34
	4.2.1. SCIAMACHY/ENVISAT	35
	4.2.2. TANSO-FTS/GOSAT	37
	4.2.3. TROPOMI/Sentinel-5P	38
	4.3. Obtención de los datos y preprocesamiento	39
	4.3.1. SCIAMACHY/ENVISAT	40
	4.3.2. TANSO-FTS/GOSAT	42
	4.3.3. TROPOMI/Sentinel-5P	46
	4.4. Análisis	48
	4.4.1. Construcción de estadísticos resúmenes para cada producto satelital	48
	4.4.3. Análisis de la serie temporal de CH ₄ durante 2009-2020	49
5.	Resultados y discusión	51
	5.1. SCIAMACHY/ENVISAT	52

5.1.1.	Análisis de los niveles medios anuales de CH ₄ sobre Argentina	54
5.1.2.	Análisis de los niveles medios mensuales de CH ₄ sobre Argentina	57
5.1.3.	Comparación entre áreas de producción y humedales - SCIAMACHY.....	63
5.2.	TANSO-FTS/GOSAT	65
5.2.1.	Análisis de los niveles medios anuales de CH ₄ en Argentina	66
5.2.2.	Análisis de los niveles medios mensuales de CH ₄ en Argentina.....	71
5.2.3.	Comparación entre áreas de producción y humedales - GOSAT	75
5.2.4.	Análisis de la serie de tiempo y la tendencia del CH ₄	76
5.3.	TROPOMI/SENTINEL-5P.....	79
5.3.1.	Observación de un foco emisor de CH ₄ durante enero de 2019.....	88
6.	Conclusiones.....	89
7.	Bibliografía	93

1. Introducción

En el contexto de una inminente crisis climática, monitorear los principales gases de efecto invernadero es una tarea imprescindible para la toma de decisiones. El metano (CH₄) es el gas de efecto invernadero (GEI) más importante después del dióxido de carbono (CO₂). Debido a que es 80 veces más efectivo que el CO₂ para atrapar calor en la atmósfera en un período de 20 años, y su tiempo de permanencia en el ambiente es de una década, la reducción de las emisiones de CH₄ ha sido propuesta como una estrategia efectiva a corto plazo para mitigar el cambio climático (Dlugokencky et al., 2011; Shoemaker et al., 2013). Por otro lado, el CH₄ es también precursor de la formación de ozono troposférico, que trae consecuencias sobre la salud de la población (West et al., 2006, Isaken et al., 2009).

Las fuentes antropogénicas de CH₄ representan el 60% de las emisiones totales (IPCC, 2013). Entre las fuentes principales se encuentran la ganadería y la agricultura, los rellenos sanitarios, la industria del petróleo, incluyendo toda la cadena de producción del gas natural, la producción de petróleo, la minería de carbón y la quema de biomasa (Puliafito et al., 2020).

Diversos estudios indican que las emisiones de CH₄ de la industria petrolera son probablemente subestimadas (Brandt et al., 2014; Kort et al., 2014; Schneising et al., 2014; Lyon et al., 2015; Varon et al., 2019). Si bien estas emisiones surgen de un conjunto de fuentes puntuales densamente agrupadas, sólo un 7% de los pozos contribuye con el 50% de las emisiones totales (Rella et al., 2015, Zavala-Araiza et al., 2015, Zavala-Araiza et al., 2017). La identificación y acción sobre los pozos de alta emisión es una estrategia económicamente plausible para la reducción de las emisiones de CH₄ (International Energy Agency, 2017).

La industria petrolera argentina tiene producciones anuales de petróleo y gas natural entre 28 y 47 millones de m³ (IAPG, 2019). El gas natural representa más del 50% de la energía primaria en nuestro país (Griffa, 2019). En este sentido, Argentina se caracteriza por tener el segundo recurso más grande de gas no convencional a nivel mundial y el cuarto de petróleo no convencional (EIA, 2013).

Las concentraciones de fondo de CH₄ se conocen a escala planetaria mediante una red de monitoreo in situ y por mediciones aéreas (Nisbet et al., 2016). Estas mediciones se realizan principalmente lejos de las fuentes de emisión, dado que buscan determinar las concentraciones de fondo de CH₄. Por ejemplo, en Argentina se realizan en Tierra del Fuego (World Meteorological Organization, 2020).

Dentro de las áreas de producción de gas y petróleo, las empresas cuentan con distintos métodos para la detección y medición de los escapes accidentales de CH₄. Todos ellos implican la manipulación directa del instrumental por parte de un operador en las inmediaciones de las instalaciones, actividad que requiere de medidas de seguridad especiales (Bylin et al, 2011). Aún los métodos más efectivos que permiten detectar las

fugas a cierta distancia, como cámaras infrarrojas, requieren de un operador y su costo es elevado (Bylin et al, 2011).

La falta de un sistema de monitoreo a escala regional imposibilita el control ambiental del recurso aire. De esta forma, no se cuenta con una metodología para la determinación de pérdidas de CH₄ en su transporte u otro tipo de fugas accidentales que puedan incurrir.

En este contexto, surge la necesidad de un monitoreo frecuente de las emisiones a nivel de las cuencas. La implementación de imágenes satelitales en el monitoreo de rutina permite abarcar una extensa cobertura espacial, brindando información de amplias zonas e incluso áreas inaccesibles (Frankenberg et al., 2005; Jacob et al., 2016). Los sensores empleados en la teledetección de gases presentan una buena resolución radiométrica y un período de revisita diario o de pocos días, permitiendo identificar los componentes de la atmósfera mediante un monitoreo regular (Engel-Cox et al., 2004).

Actualmente, son pocos los estudios que muestran los cambios en los niveles de CH₄ en el país (Fusé et al., 2016; Puliafito et al., 2020a, Puliafito et al., 2020b). No contar con datos históricos de contaminantes atmosféricos relacionados con la industria petrolera dificulta la evaluación ambiental a largo plazo de esta actividad económica. En este sentido, se propone contribuir a la elaboración de una metodología de trabajo que permita el monitoreo de metano para proporcionar información crítica a los organismos de gestión ambiental, y a los responsables de la toma de decisiones con el fin de mejorar la calidad de vida de la población.

2. Objetivos

Objetivo general

Evaluar el uso de información satelital como metodología de monitoreo continuo de metano en la atmósfera dentro de Argentina, con especial interés en zonas de explotación gasífera y petrolera.

Objetivos específicos

- Evaluar los productos satelitales para la detección de CH₄ de TROPOMI/Sentinel-5P, SCIAMACHY/ENVISAT y TANSO-FTS/GOSAT.
- Analizar la serie de tiempo de los niveles de CH₄ en la columna atmosférica en la última década y evaluar la tendencia de este contaminante en la Cuenca Neuquina.
- Determinar una línea base para la zona e identificar las áreas donde se presentaron máximos niveles de CH₄ para el período de estudio.

3. Marco Teórico

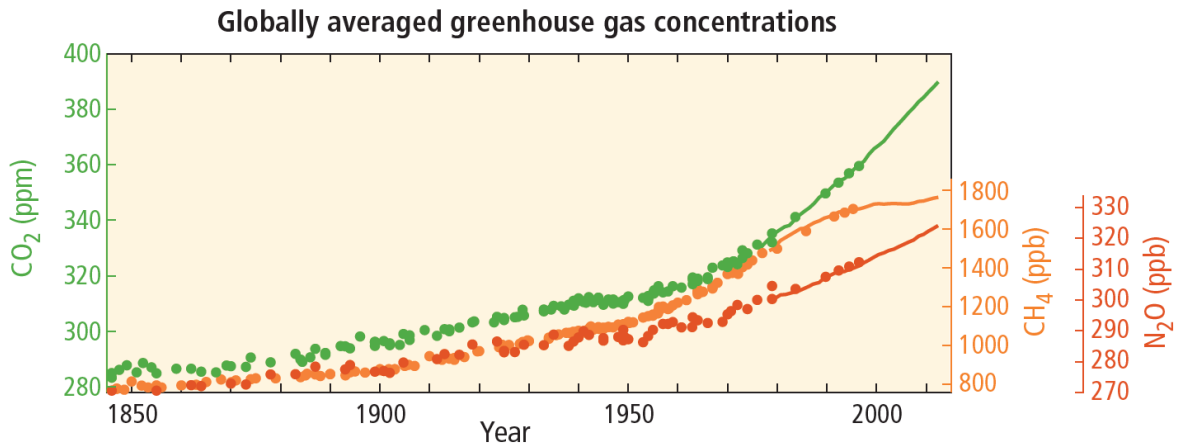
En esta sección se describe brevemente qué es el cambio climático y los gases de efecto invernadero, junto con las principales proyecciones climáticas en Argentina. Se hace énfasis en el gas CH₄ como GEI, su tendencia a escala planetaria y su distribución. Se detallan las principales fuentes y sumideros que influyen en los niveles atmosféricos de este gas, y se describe el perfil de emisiones de nuestro país, obtenido a partir del último Inventario Nacional de GEIs. Se desarrollan en detalle las emisiones de CH₄ provenientes de la industria de gas y petróleo, y las diferentes metodologías disponibles para su control. Finalmente, se describen los fundamentos de la teledetección atmosférica necesarios para el desarrollo de este trabajo.

3.1. Cambio climático y proyecciones en Argentina

El cambio climático es un proceso complejo y multicausal asociado mayormente a las altas emisiones de gases de efecto invernadero. Diversos estudios evidencian que las actividades antrópicas han generado la mayor parte del calentamiento mediante las emisiones de GEIs, cuyos niveles se han incrementado sin precedentes desde épocas pre-industriales (**Fig. 1**) (Antonio, 2010; IPCC, 2014). Las altas concentraciones de GEIs en la atmósfera han producido variaciones en la temperatura media global, un mayor nivel de exposición a la radiación solar y una disminución del pH de los océanos (Villafañe et al., 2013). En consecuencia, se han visto modificados los regímenes de lluvias, sequías, vientos e incendios en diferentes regiones del planeta. A su vez, los cambios en las precipitaciones y en la acumulación de nieve han alterado los sistemas hidrológicos, afectando al recurso acuático tanto en cantidad como en calidad (Maenza et al., 2017).

Figura 1

Concentraciones de gases de efecto invernadero promediadas a nivel mundial

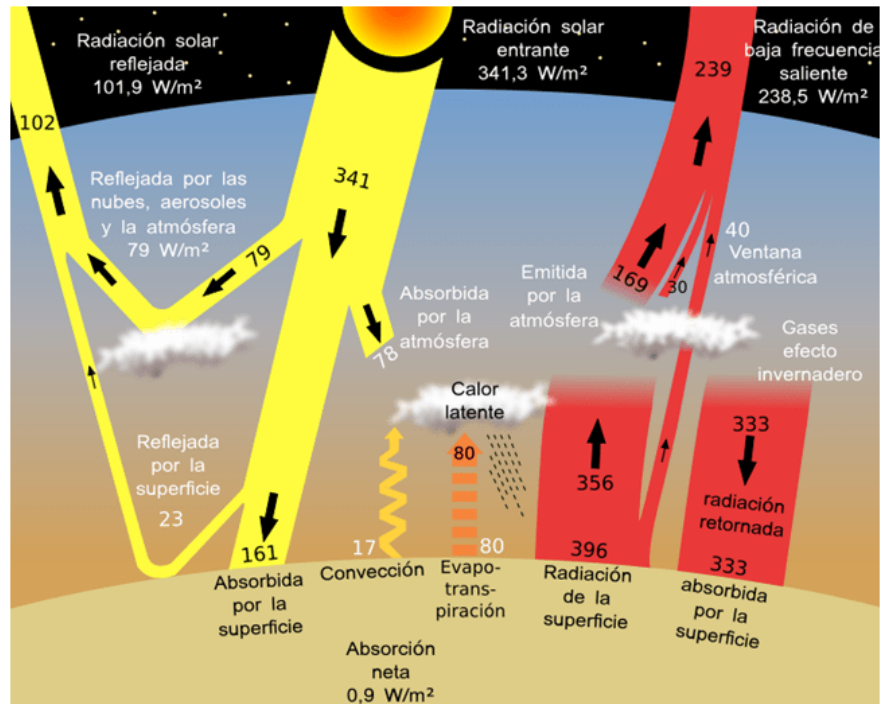


Nota. Concentraciones atmosféricas de CO₂ (verde), CH₄ (naranja) y N₂O (rojo) en función del tiempo (años). Las concentraciones fueron determinadas por datos en núcleos de hielo (puntos) y mediciones atmosféricas (líneas). Adaptado de *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 3), por Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds).

Los GEIs como el CO₂ y el vapor de agua, junto con otros constituyentes menores de la atmósfera como el CH₄, el N₂O y el O₃, tienen fuertes bandas de absorción en la región ventana del espectro de emisión terrestre correspondiente al Infrarrojo (IR). De esta forma, regresa hacia la Tierra parte de la energía re-emitida por la superficie terrestre, que de lo contrario escaparía hacia el espacio. Esto constituye el conocido efecto invernadero (**Fig. 2**), un fenómeno natural que mantiene la temperatura media óptima para la vida en el planeta. Sin embargo, pequeños cambios en las concentraciones de estos gases pueden producir un efecto significativo en el flujo radiativo neto. Al aumentar la concentración de los GEIs, la cantidad de energía en forma de calor retenida por la atmósfera es cada vez mayor (Velázquez de Castro González, 2005).

Figura 2

Balance de energía de la Tierra



Nota. Los gases de efecto invernadero retornan más del 80% de la energía emitida por la superficie terrestre. Adaptado de "Earth's global energy Budget" (p. 314), por K. E. Trenberth, J. T. Fasullo y J. Kiehl, 2009, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90 (3).

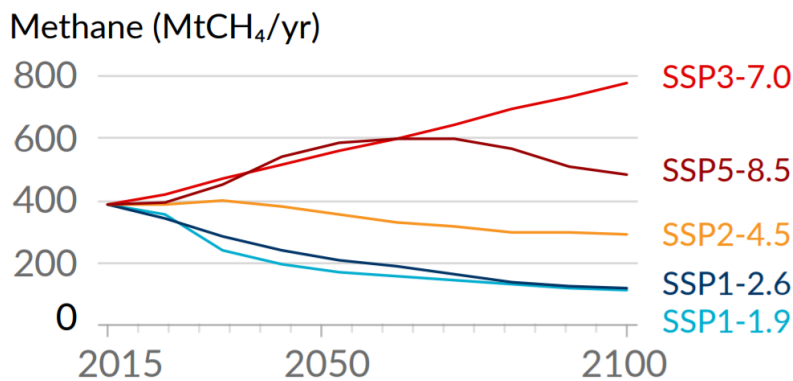
Se estima que el calentamiento promedio global alcanzó los 0.85°C en el período entre 1880 y 2012 (IPCC, 2014). En Argentina, se tiene registro que la temperatura media aumentó 0.5°C entre 1901 y 2012 (Barros et al., 2015). Por su parte, las precipitaciones aumentaron sobre la región subtropical del país, alcanzando niveles 30% superiores a sus valores iniciales (Castañeda et al., 1994). La evidencia paleoclimática indica que esta tendencia de precipitaciones iniciada en 1960 no tiene precedentes en los últimos 250 años (Piovano et al., 2002), señalando la importante influencia de los GEI en estos cambios. A su vez, el incremento de las lluvias se concentra en precipitaciones extremas, trayendo consecuencias sobre grandes extensiones de planicies inundables en el país (Doyle et al., 2012).

En función de la incertidumbre asociada a estos cambios y sus potenciales impactos, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), una organización de las Naciones Unidas fundada en 1988, se dedica a evaluar la literatura científica relevante para entender el riesgo del cambio climático inducido por el humano. Las proyecciones del IPCC indican que el cambio climático se acelerará generando eventos extremos con mayor frecuencia, haciendo a los humanos y los sistemas, tanto naturales como antrópicos, más vulnerables frente a estos eventos (IPCC, 2014).

En su 6^{to} Reporte, el (IPCC, 2021) evaluó los cambios en el clima a corto (2021-2040), medio (2041-2060) y largo plazo (2081-2100) respecto al período de referencia (1850-1900), bajo cinco escenarios de concentraciones posibles de GEIs (**Fig. 3**). Estos escenarios (SPP, *Shared Socioeconomic Pathways*) tienen en cuenta distintos factores que afectan las emisiones de cada región, como aspectos socioeconómicos de la población, cambios en el uso de suelo, educación, políticas de mitigación y otros. En los próximos 20 años, se espera que la temperatura global alcance 1.5°C de incremento respecto a 1850-1900, superando el umbral planteado por el acuerdo de París en 2015. Este calentamiento es incluso independiente de los diferentes escenarios de emisiones posibles (IPCC, 2021).

Figura 3

Emisiones de CH₄ antropogénicas por año



Nota. Emisiones anuales de CH₄ en las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP). Adaptado de *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 16), por Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021, Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (eds).

Para el 2100, los cambios varían según la trayectoria considerada (IPCC, 2021). Bajo el escenario intermedio SSP2-4.5 se proyecta un incremento global de temperatura de 2.1-3.5 °C. Este escenario requiere que las concentraciones de CO₂ alcancen su máximo a mediados del siglo XXI y luego comiencen a bajar, junto con una disminución de los niveles de CH₄ a partir de 2050 (**Fig. 3**). Bajo el escenario más extremo, SSP5-8.5, el aumento de temperatura es considerablemente superior, alcanzando valores entre 3.3 y 5.7 °C. En SSP5-8.5 los niveles atmosféricos de los GEIs continúan aumentando durante todo el siglo XXI y las concentraciones de CO₂ se duplican aproximadamente en 2050.

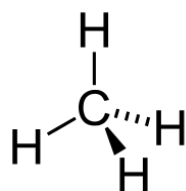
Particularmente en Argentina, se proyecta un cambio en las precipitaciones medias, con incrementos en el norte del país y una disminución importante en toda la Patagonia. Por otro lado, con el aumento de temperatura, continúa el retroceso de los glaciares y el deshielo del permafrost en la cordillera de los Andes, provocando la desaparición de algunas cuencas (Pasquini et al., 2008). La escasez de agua puede llevar a la utilización de agua subterránea para consumo humano, incrementando los costos de su uso para irrigación y forzando el abandono de la agricultura en la región (Boninsegna, 2014).

3.2. El CH₄ como gas de efecto invernadero.

El CH₄ es el hidrocarburo más abundante en la atmósfera y una de las fuentes principales de energía. Por su simple estructura, es el alcano más sencillo, con un único átomo de carbono unido a cuatro átomos de hidrógeno. El CH₄ es un gas incoloro e inodoro (**Fig. 4**).

Figura 4

Molécula de CH₄



Nota. La molécula de CH₄ tiene una geometría tetraédrica, todos los átomos de hidrógeno están separados entre sí en un ángulo de 109,5°. Adaptado de *Wiki Orgánica / Fandom*, (<https://organica.fandom.com/es/wiki/Metano>).

En la atmósfera, se presenta como un gas traza, constituyendo menos del 1% de su masa gaseosa. Su concentración actual en la troposfera es del orden de 1877 ± 2 ppb (World Meteorological Organization, 2020). A su vez, es el principal componente del gas natural, recurso que representa más del 50% de la energía primaria en nuestro país (Griffa, 2019).

Para evaluar los efectos radiativos de cada gas, así como sus diferentes tiempos de permanencia en la atmósfera, se utiliza el índice GWP (Potencial de Calentamiento Global) (**Ecuación 1**). Este índice define el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce hoy una liberación instantánea de 1 kg de un GEI, en comparación con el causado por la misma masa de CO_2 , que se toma como patrón con un GWP de 1 (IPCC, 2001).

$$GWP = \frac{\int_0^{\infty} f_i(t)C_i(t)dt}{\int_0^{\infty} f_o(t)C_o(t)dt} \quad (1)$$

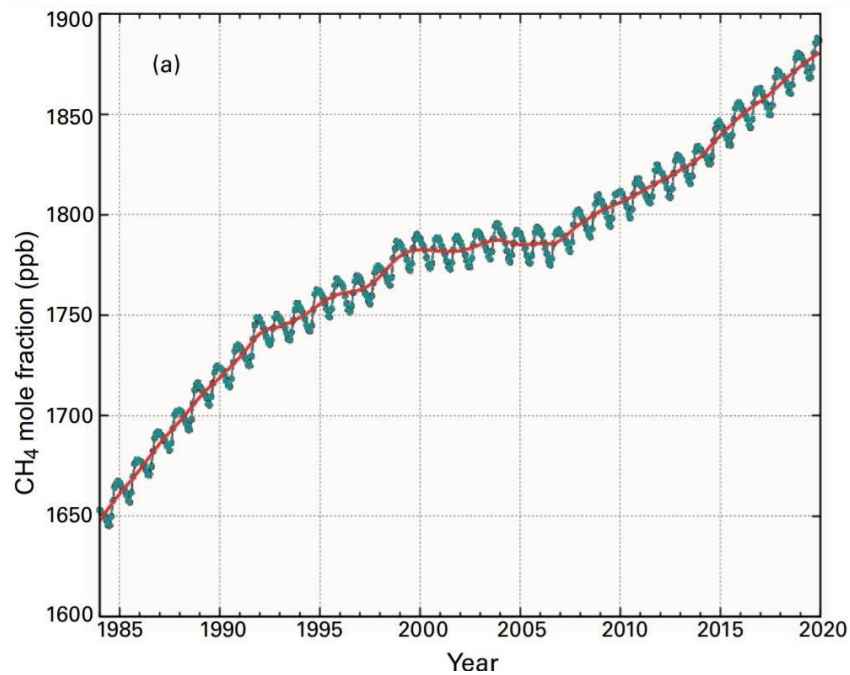
En la **Ecuación 1**, $C_i(t)$ es la concentración de CH_4 a un tiempo t luego de la emisión de una cantidad dada a $t = 0$, mientras que $f_i(t)$ es la capacidad del CH_4 de retener energía en forma de calor por unidad de concentración al cabo del mismo tiempo t . $C_o(t)$ y $f_o(t)$ corresponden al CO_2 (Harvey, 1993).

El CH_4 es el segundo GEI más importante. El valor del índice GWP de CH_4 dentro de los 100 años es de 28 (IPCC, 2018). Esto indica que, si se emite a la atmósfera la misma masa de CH_4 y de CO_2 , el CH_4 contribuye 28 veces más al efecto invernadero que el CO_2 durante los próximos 100 años.

Observaciones atmosféricas muestran incrementos significativos en los niveles globales de CH_4 durante el siglo XX (**Fig. 5**), a una tasa constante de 15 ppb/año, con una corta estabilización a fines de los 90' y un rápido aumento a partir del 2006 (Blake, 2013), debido principalmente al uso de combustibles fósiles y a la agricultura intensiva (Hartmann et al., 2013). Las concentraciones atmosféricas globales de CH_4 se incrementaron en un 200% en épocas preindustriales hasta la actualidad, desde 720–740 ppb a ~ 1800 ppb (Dlugokencky et al., 2011).

Figura 5

Fracción molar media global de CH₄



Nota. La línea roja representa las medias mensuales de CH₄ sin la variación estacional. La línea de puntos azules son los promedios mensuales obtenidos a partir de 134 estaciones terrestres. Adaptado de *WMO Greenhouse Gas Bulletin* (p. 6), por World Meteorological Organization, 2020.

Frente a la preocupación que generan altos niveles de GEI en relación al calentamiento global, la reducción de las emisiones de CH₄ ha sido propuesta como una estrategia efectiva a corto plazo para mitigar el cambio climático. El tiempo de vida medio del CH₄ (tiempo promedio de residencia de una molécula en la atmósfera antes de su remoción por transformación química) es de 9.1 años, relativamente corto frente a los 100 años del CO₂. Sin embargo, su principal producto de degradación es el CO₂, continuando los efectos negativos sobre el clima. En vista a esto, la reducción de las emisiones de CH₄ resulta la mejor estrategia para limitar el aumento de la temperatura global dentro de las próximas décadas (Dlugokencky et al., 2011; Shoemaker et al., 2013).

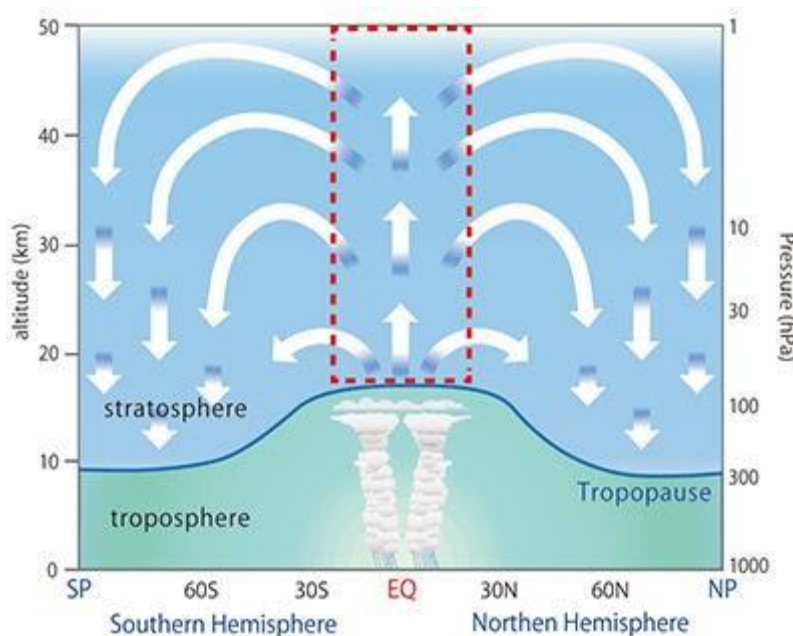
3.3. Distribución global del CH₄

La distribución de CH₄ en el globo terráqueo no es regular. Las concentraciones de CH₄ disminuyen drásticamente desde los trópicos hacia los polos. Este fenómeno se conoce como el gradiente latitudinal de la concentración de CH₄ y se manifiesta, en el hemisferio sur, como un incremento a razón de un 1% por grado de latitud de sur a norte (Huarte et al., 2010).

Respecto a los motivos de la ocurrencia de este gradiente hemisférico norte-sur en la concentración de un gas traza, (Houweling, 2000) resalta la circulación de Brewer-Dobson como origen de este gradiente. En la zona ecuatorial, ocurre un transporte convectivo del aire desde la troposfera a la estratósfera. En la estratósfera, el CH₄ es transportado hacia los polos donde, también por un transporte convectivo, el aire desciende a la troposfera (Fig. 6). Como el transporte de especies vertical es más lento que los procesos de mezcla troposféricos, solo un 5-10% del CH₄ total se encuentra en la estratósfera y es la distribución del CH₄ en este estrato lo que genera, para este autor, el efecto del gradiente latitudinal.

Figura 6

Circulación de Brewer-Dobson



Nota. En la estratosfera (área azul) el aire se eleva sobre el ecuador, se extiende a los hemisferios y desciende cerca de los 60 ° de latitud norte y sur. Esta circulación a gran escala se denomina circulación de Brewer-

Dobson y es el mecanismo por el cual el CH₄ es transportado globalmente. Adaptado de Press Releases < JAMSEC, por *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*, 2013, (https://www.jamstec.go.jp/e/about/press_release/20130523/).

3.4. Sumideros de CH₄

El CH₄ es removido de la atmósfera principalmente por oxidación con el radical oxhidrilo (OH•). Esta reacción ocurre a una tasa estimada de 506 Tg/año en la troposfera, lo que explica el 90% de la pérdida global media de este gas en la atmósfera (Baird, 2001). Una pequeña fracción del CH₄ escapa hacia la estratosfera, principalmente en la zona de convergencia intertropical (ZCIT) sobre el ecuador. Ya en la estratósfera, la oxidación del CH₄ ocurre en menor medida a 40 Tg/año.

La reacción de oxidación del CH₄ con el radical OH• se expresa con la siguiente ecuación química:



Este paso inicia una secuencia compleja de reacciones atmosféricas cuyo primer producto estable es el formaldehído (CH₂O), que luego es oxidado por fotólisis y reacción con el OH• para dar CO y, finalmente, CO₂ (Seinfeld y Pandis, 2006).

El radical OH• es la especie oxidante principal en la troposfera y se genera a partir de la reacción entre oxígeno atómico en estado excitado (O•) y vapor de agua. Este O• se produce en la fotólisis del O₃. El OH• es generado en ciclos catalíticos que llevan a una concentración sostenida del orden de 10⁶ moléculas/cm³ durante horas diurnas (Seinfeld y Pandis, 2006). A su vez, los niveles de OH• en el hemisferio sur son alrededor de un 20% superiores, como resultado de grandes cantidades de CO de origen antropogénico en el hemisferio norte que reaccionan con los OH• (Mayer et al., 1982).

Otro sumidero secundario de CH₄ es la captación microbiana en suelos, que contribuye con una tasa de remoción aproximada de 40 Tg/año, representando el 6% de la tasa global media (Baird, 2001). La captación de CH₄ se debe a la actividad de bacterias metanotrofas y ocurre principalmente en suelos forestales (Ontiveros et al., 2016).

Según Mansilla (2018), el principal factor que regula la variación estacional del CH₄ a escala global (**Fig. 5**) es la fluctuación de las emisiones provenientes de los humedales. Debido a que la actividad microbiana aumenta con la temperatura, la variabilidad interanual del CH₄ sigue el mismo patrón, presentando máximos durante los meses cálidos. A escala local y en ausencia de fuentes se espera que las concentraciones de CH₄ sean más altas en invierno y más bajas en verano (Dalsøren et al., 2015), dado que una alta intensidad de radiación ultravioleta y elevadas concentraciones de vapor de agua en la atmósfera favorecen la formación de OH•.

3.5. Fuentes de CH₄

El CH₄ atmosférico proviene tanto de fuentes naturales como antropogénicas, de origen biogénico como no biogénico. El CH₄ de origen biogénico proviene exclusivamente del metabolismo microbiano en entornos anaeróbicos (Hernández, 2010). Los microorganismos metanogénicos pertenecen al dominio *Archaea* y se distribuyen en diversos ambientes como los humedales, cultivos de arroz, rellenos sanitarios, el tracto gastrointestinal de algunos animales e insectos, sedimentos marinos, turberas, etc. (Stams y Plugge, 2010). Las emisiones de CH₄ de fuentes naturales comprenden el 30% de las emisiones totales, siendo los humedales los mayores emisores con un aporte entre 100 y 231 Tg/año (Denman et al., 2007).

Junto con la tendencia creciente de este GEI, la relación isotópica ¹³C/¹²C en el CH₄ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$) ha virado hacia valores cada vez más negativos desde 2007 (Nisbet et al., 2016). Esta evidencia sugiere que el aumento en los niveles de CH₄ está dominado por un incremento significativo de las emisiones biogénicas, lo cual puede deberse al aumento de los humedales tropicales por las anomalías positivas de lluvias, como a la expansión agrícola-ganadera. La incertidumbre asociada a estos cambios de tendencia y el complejo feedback entre el CH₄ y la biósfera han incentivado diversos estudios e inventarios de CH₄ (Puliafito et al., 2020).

Por otra parte, las fuentes antropogénicas de CH₄ aportan más del 60% de las emisiones totales a nivel global (IPCC, 2014). Dentro de las fuentes antropogénicas biogénicas, tenemos actividades como la ganadería, los arrozales y los rellenos sanitarios; mientras que, entre las fuentes antrópicas no biogénicas, tenemos las emisiones provenientes de la quema de biomasa, la minería de carbón y la industria del gas y el petróleo (Puliafito et al., 2020). En Argentina, la gran extensión latitudinal del territorio

favorece múltiples usos del suelo, lo que podría resultar en emisiones de CH₄ diferenciadas (Denman et al., 2007).

Argentina no cuenta con suficientes mediciones propias de la magnitud y el origen de las emisiones de CH₄. Al igual que otros países en iguales condiciones, emplea factores de emisión sugeridos por el IPCC para estimar las emisiones de los GEIs a partir de un inventario teórico realizado bajo la metodología *bottom-up*. En el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INVGEI), realizado por la (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019) bajo los lineamientos de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), se establecen las emisiones de GEIs según sus factores de emisión para los sectores de energía, industria, agricultura y ganadería, cambios de uso del suelo, silvicultura y residuos de Argentina hasta el 2016. El 90% de las emisiones de GEIs durante el período analizado corresponde a la agricultura, ganadería, energía, silvicultura y otros usos del suelo (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019). El total de emisiones durante 2016 fue de 364 MT de CO₂ equivalentes, con un 20% correspondiente al CH₄.

Según el INVGEI de 2019, la ganadería y agricultura son responsables del 60% de las emisiones de CH₄ en nuestro país. En segundo lugar, los residuos aportan el 24% de las emisiones de este gas. El sector energía aporta el 10%, principalmente por emisiones fugitivas de la red de distribución de gas natural. El 6% restante de las emisiones surge de los cambios de bosque, vegetación leñosa y pastizales a tierras cultivadas.

3.6. Emisiones de CH₄ de la industria de gas y petróleo

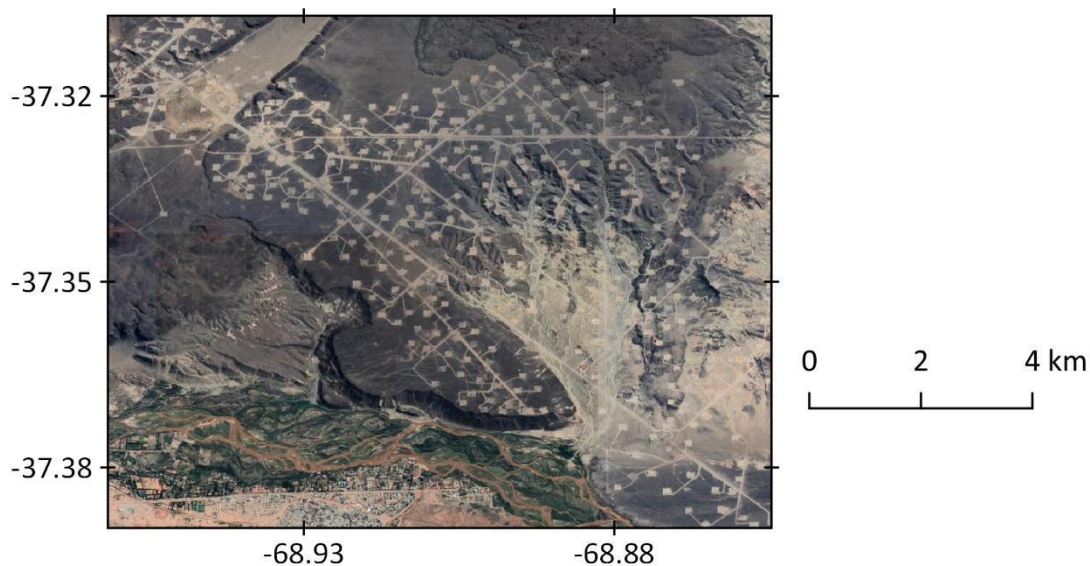
Las emisiones de CH₄ de la industria de gas y petróleo son la principal fuente de emisión antropogénica no biogénica. Las fugas de CH₄ de esta industria son de ~70-100 Tg de CH₄ por año a nivel global y representan el 20% de las emisiones totales de origen antropogénico (Denman et al., 2007). Estas emisiones están asociadas a diferentes procesos de las actividades *upstream* (desarrollo de pozos y producción) y *midstream* (*transporte y almacenamiento*) a lo largo de toda la cadena de producción hidrocarburífera (Brantley et al., 2014).

Los sitios de producción de gas y petróleo consisten principalmente en las cabezas de pozos donde se produce la extracción, las unidades de separación y los tanques de almacenamiento. Las fugas de CH₄ de estas instalaciones surgen de un gran conjunto de

fuentes puntuales densamente agrupadas (**Fig. 7**). Las emisiones, a su vez, dependen de factores como la formación geológica (yacimientos), el diseño de los equipos, su estado de mantenimiento y los procesos que estén en operación (Brantley et al., 2014).

Figura 7

Pozos en Rincón de los Sauces, Neuquén



Nota. Imagen satelital de Google Satellite.

Durante la etapa productiva de los pozos, las fuentes de emisión pueden ser los compresores y las bombas que traen el gas hasta la superficie. Se ha estimado que sólo un 7% de los pozos contribuye con el 50% de las emisiones totales de esta industria (Zavala-Araiza et al., 2015), estos se conocen como pozos de alta emisión. Parte de las fugas también se debe a operaciones habituales y premeditadas como los venteos en boca de pozo, que se efectúan para liberar presión de las cañerías y equipamientos. Estos venteos pueden implicar la quema del gas o su liberación directa a la atmósfera (Moore et al., 2014). Al final de la vida útil de un pozo, este puede ser sellado o directamente abandonado. En Alberta, Canadá, se encontró que un 4% de los pozos abandonados tienen pérdidas de gas (Watson y Bachu, 2009).

El gas crudo producido en los pozos es distribuido en la cuenca mediante una red de cañerías y estaciones de compresión. En esta etapa, se generan emisiones continuas debido a pérdidas en cañerías envejecidas, válvulas y sellos. Ocasionalmente, también se liberan grandes cantidades de CH₄ en operaciones de mantenimiento o accidentes (Houweling,

2000). Además, algunos estudios han encontrado fugas significativas de la red de distribución de gas natural en ciudades (Phillips et al., 2013; Urteaga, 2016).

Los tanques de almacenamiento de gas condensado pueden ser una fuente importante de emisiones de CH₄, que dependerá de la ingeniería y de las estrategias de control aplicadas (Hendler et al., 2006). Las fugas de los tanques constituyen una fuente no solo de CH₄, sino también de COVs y HAPs. Estas emisiones se pueden ver incrementadas durante su transporte en camiones (Field et al., 2014).

La complejidad para cuantificar las emisiones fugitivas de esta industria radica en que las pérdidas de CH₄ son difíciles de detectar y que pueden ser intermitentes, ya que varían con el tiempo, según la edad del pozo y cambios en la presión y en los niveles de producción (Brantley et al., 2014). Además, la alta variabilidad entre los sitios disminuye la posibilidad de obtener una muestra significativa sin considerar un extenso muestreo.

Aun así, la cadena de producción hidrocarburífera representa actualmente la oportunidad de menor costo y mayor disponibilidad para reducir las emisiones de CH₄, con soluciones técnicamente viables y rentables (IEA, 2017; Nisbet et al., 2020). A su vez, las entidades responsables de estas infraestructuras, tanto estatales como privadas, son pocas, lo que facilita la implementación de estrategias enfocadas a reducir la tasa de emisión de CH₄.

3.7. Control de las emisiones de CH₄

Existen distintas metodologías para el monitoreo de las emisiones gaseosas. Las más utilizadas están basadas en un enfoque *bottom-up*. Esta metodología estima las emisiones regionales construyendo inventarios teóricos, basados en factores de emisión asociados a cada actividad (Puliafito et al., 2017). Los factores de emisión surgen de mediciones realizadas en una cantidad representativa de fuentes. Los inventarios se realizan a partir de datos locales con alta resolución, tales como flujos o volúmenes de producción, tipo y longitud de cañerías, etc. Esta aproximación es empleada por los países que se reportan bajo el Protocolo de Kyoto.

Estudios recientes basados en mediciones aéreas y satelitales mostraron que las emisiones de CH₄ de la industria petrolera se encuentran subestimadas (Kort et al., 2014; Schneising et al., 2014; Varon et al., 2019). Esta diferencia puede deberse a eventos cortos

que ocurren a tasas diferentes de las predichas en los inventarios. Los estudios *bottom-up* pueden subestimar las emisiones al aplicar factores de emisión basados en medidas que excluyen los valores extremos en una distribución sesgada de las tasas de emisión. Estos valores corresponden a fuentes poco frecuentes que contribuyen con una gran fracción del total de emisiones (Lyon et al., 2015).

Si bien las empresas cuentan con distintos métodos para la detección y medición de los escapes de gas, todos ellos implican la manipulación directa de instrumental en la inmediación de las instalaciones (Bylin et al, 2011). Para casos de emergencia, la detección se realiza con cámaras infrarrojas, pero estas no permiten la cuantificación de las emisiones (Bylin et al, 2011). Además, estos sistemas de monitoreo muchas veces no logran la detección de fugas difusas donde los niveles de emisión son más bajos (Varon et al., 2019).

Un segundo enfoque para la estimación de las emisiones es el llamado *top-down*, el cual se centra en mediciones regionales. En este caso, las tasas de emisiones se pueden derivar de mediciones satelitales, conociendo la distribución vertical de las concentraciones atmosféricas y empleando modelado inverso (Lyon et al., 2015).

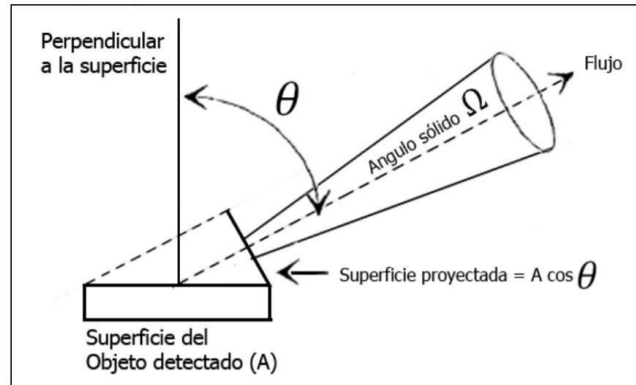
La implementación de imágenes satelitales en el monitoreo ofrece como ventaja la posibilidad de abarcar una extensa cobertura espacial, brindando información de amplias zonas, incluyendo áreas inaccesibles (Engel-Cox et al., 2004). En este sentido, algunos trabajos muestran la posibilidad de desarrollar un sistema de detección de escapes de CH₄ con imágenes satelitales, facilitando su localización temprana y disminuyendo los riesgos, el daño ambiental y los costos que estos generan (Cusworth et al., 2018; Jacob et al., 2016; de Gouw et al, 2020).

3.8. Fundamentos de la teledetección atmosférica

La teledetección es un modo de obtener información desde la distancia. Los equipos de teledetección pueden dividirse en activos o pasivos dependiendo la fuente de iluminación que utilicen. Mientras que los equipos activos tienen una fuente propia de radiación, los instrumentos ópticos de observación pasiva utilizan la energía lumínica proveniente del sol para realizar la medición (Engel-Cox et al., 2004). Estos sensores miden la *radiancia*, que se define como el total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida (**Fig. 8**), en unidades de W/m²sr (Chuvieco, 2000).

Figura 8

Diagrama de un ángulo sólido

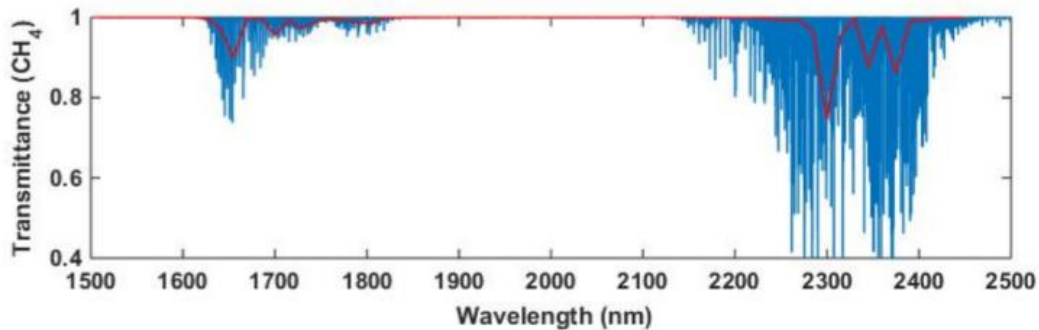


Nota. El ángulo sólido se define como el ángulo tridimensional que refiere a la sección completa de la energía transmitida. Adaptado de *Fundamentos de teledetección espacial* (p. 52), por E. Chuvieco, 2000, Rialp.

El enfoque de la teledetección atmosférica se basa en medir los cambios en la radiancia al tope de la atmósfera. Los gases, sólidos y líquidos presentes en la columna atmosférica absorben, emiten y dispersan la radiación electromagnética del sol (Simonds et al., 1994). La energía que ingresa a la atmósfera es conocida y se puede estimar con una buena aproximación como la emisión de un cuerpo negro a temperaturas de 5800 K (Chuvieco, 2000). La energía saliente, por otro lado, es el resultado de las modificaciones que sufre el espectro solar por los procesos de dispersión, absorción y emisión a lo largo de su trayectoria a través de la atmósfera (Gottwald y Bovensmann, 2014).

Las mediciones de radiancia permiten recuperar las cantidades y distribuciones de los gases traza a partir de sus bandas de absorción. La recuperación de las concentraciones se centra en las diferencias entre los espectros de absorción de los componentes atmosféricos, esta técnica se conoce como Espectroscopia de Absorción Óptica Diferencial (DOAS) (Jacob et al., 2016). El CH₄ presenta dos bandas de absorción características, una en el Infrarrojo cercano (NIR) y otra en el Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) (**Fig. 9**).

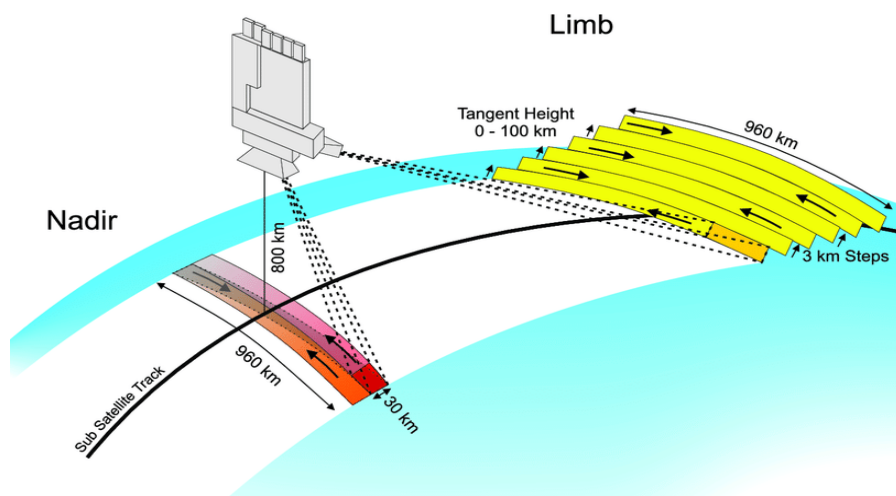
Figura 9
Espectro de transmitancia del CH₄ en el Infrarrojo



Nota. El espectro del CH₄ presenta dos picos de mínima transmitancia (T) (con *Absorbancia* = $-\log(T)$) alrededor de 1600-1700 y 2300-2400 nm, correspondientes al NIR y SWIR respectivamente. Adaptado de “Detecting the Sources of Methane Emission from Oil Shale Mining and Processing Using Airborne Hyperspectral Data” (p. 5), por C. Xiao et al., 2020, *Remote Sens.*, 12 (537).

Los sensores de teledetección atmosférica pueden aplicar distintas geometrías de observación, o modos. El más comúnmente empleado para las observaciones de CH₄ es el modo *nadir*. En este modo el sensor mide el volumen atmosférico directamente debajo del satélite, en dirección normal a la superficie de la Tierra (**Fig. 10**). Es importante destacar que estos sensores miden CH₄ en el total de la columna atmosférica, sin diferenciar entre tropósfera y alta atmósfera.

Figura 10
Modos de observación de SCIAMACHY



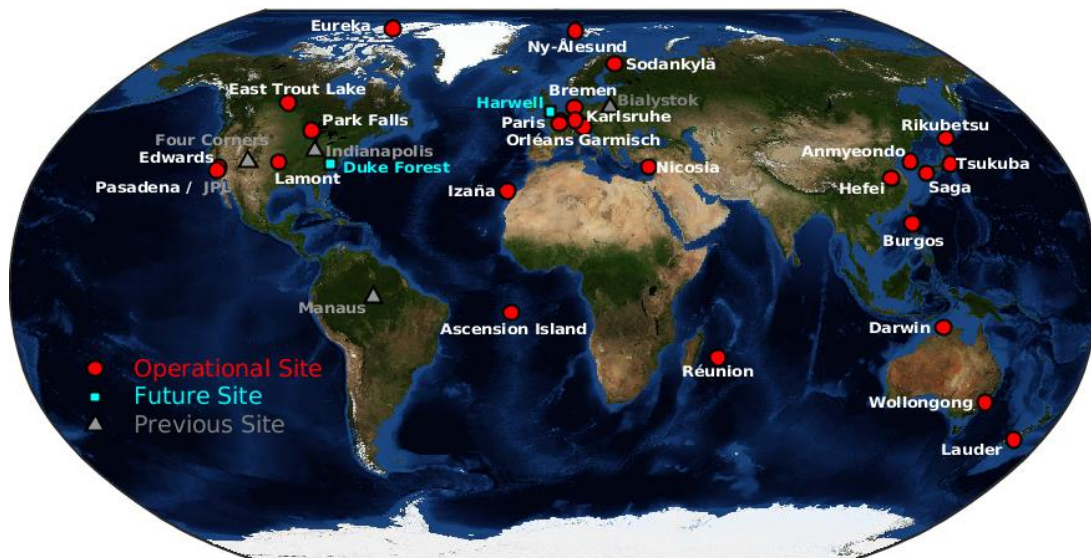
Nota. Dos de los modos de observación más destacados del sensor SCIAMACHY a bordo de ENVISAT. A la izquierda, el modo *nadir*, en dirección normal a la superficie terrestre. A la derecha, el modo *limbo*, en

dirección tangencial. Adaptado de *SCIAMACHY - Exploring the Changing Earth's Atmosphere* (p. 24), por M. Gottwald y H. Bovensmann, 2014, Springer Publishing.

Las concentraciones de CH₄ obtenidas mediante satélites son validados usando datos de la Total Carbon Column Observing Network (TCCON). TCCON es una red global de mediciones en tierra (**Fig.11**) que emplea espectrómetros de transformada de Fourier de alta resolución, grabando directamente el espectro solar en la región del infrarrojo cercano (NIR). Los datos de TCCON son calibrados con los estándares de la Organización Meteorológica Mundial (WMO).

Figura 11

Sitios de observación de la red TCCON



Nota. Los sitios operativos (rojo) se encuentran mayoritariamente en el hemisferio norte. El único punto de observación en Sudamérica (en Manaos, Brasil) ya no está en funcionamiento. Adaptado de TCCON Data Archive, por Total Carbon Column Observing Network, (<https://tccodata.org/>).

3.8.1. Productos satelitales y algoritmos de recuperación

Los datos satelitales son distribuidos como productos que contienen las mediciones y otra información relacionada. Estos productos son categorizados en diferentes niveles, según el grado de procesamiento que tengan. En líneas generales, los niveles pueden describirse de la siguiente manera:

Nivel 1 (L1): el producto contiene los parámetros físicos medidos directamente por el instrumento, como las radiancias en diferentes porciones del espectro electromagnético (bandas).

Nivel 2 (L2): contiene parámetros físicos recuperados a partir de la información del Nivel 1. Las concentraciones de los componentes atmosféricos corresponden a este nivel.

Nivel 3 (L3): producto con datos proyectados sobre una grilla regular de latitud y longitud, con una determinada resolución espacial y temporal. Generalmente contienen los datos del Nivel 2, y puede incluir alguna metodología para completar zonas sin datos.

Los algoritmos o modelos empleados para derivar las concentraciones de componentes atmosféricos a partir de información espectral se conocen como algoritmos de recuperación. Son utilizados para generar los productos de Nivel 2. Las especies químicas absorben radiación en longitudes de onda específicas para cada una. La intensidad de la absorción está determinada principalmente por la cantidad de moléculas gaseosas a lo largo del camino recorrido por la luz solar hasta la superficie terrestre y reflejada hacia el satélite. El análisis de ambos factores, longitud de onda e intensidad, permite derivar las concentraciones atmosféricas de gases como el CH₄.

La dispersión generada por nubes y aerosoles puede disminuir el nivel de certeza respecto del largo del camino recorrido por la luz, y en consecuencia introducir errores en la recuperación del CH₄ (Gottwald y Bovensmann, 2014). Para disminuir estos errores se deben derivar las propiedades ópticas y la distribución vertical de aerosoles y nubes simultáneamente con las concentraciones de los gases. Los distintos sensores emplean diferentes estrategias para abordar este problema, comúnmente se emplea el método *proxy* que asume que la dispersión es la misma en las bandas de absorción del CO₂ y CH₄, por lo tanto, si la concentración de uno de estos gases es conocida, la otra puede ser recuperada (Frankenberg et al., 2006).

Al mismo tiempo, la mayoría de los algoritmos de recuperación sólo pueden procesar correctamente aquellas mediciones con poca o nula cobertura nubosa dentro del campo de visión del sensor (Yoshida et al., 2017). Por lo tanto, resulta importante la implementación de sistemas confiables para la detección de nubes en el procesamiento de los datos.

3.8.2. Unidades empleadas en teledetección atmosférica

Una de las unidades más empleadas es el radio de mezcla, o fracción molar, de CH₄ (conocido como XCH₄ en teledetección). Se define como el cociente entre la cantidad total de CH₄ (masa o moles) en un dado volumen y la cantidad total de todos los constituyentes atmosféricos en el mismo volumen (**Ecuación 2**). Esta definición incluye al vapor de agua, pero no al material particulado o agua en fase condensada (Seinfeld y Pandis, 2006). Para una especie genérica *i* puede expresarse:

$$x_i = c_i / c_{\text{total}} \quad (2)$$

Donde c_i es la concentración molar de la especie *i* y c_{total} es la concentración molar del aire. La inclusión del vapor de agua en el total de constituyentes atmosféricos implica que los radios de mezcla varían con la humedad. En consecuencia, el XCH₄ suele definirse respecto al aire seco. Las unidades que se utilizan para los radios de mezcla son ppm y ppb.

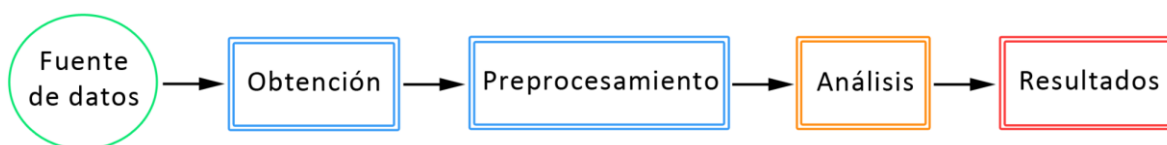
Obtener el XCH₄ a partir de sensores remotos requiere aproximaciones y modelos que necesitan datos no disponibles fácilmente. Otra unidad de concentración usualmente utilizada para gases medidos por teledetección es la Densidad del gas en la Columna Vertical (VCD), expresada como moléculas/cm². La VCD representa la concentración total del gas contenida en una columna vertical normal a la superficie de la tierra. Esta unidad de concentración no brinda información sobre la distribución vertical del gas, y está referida a una unidad de área ya que refleja lo que el sensor mide desde su posición en el tope de la atmósfera hacia abajo.

4. Materiales y métodos

En función de la poca información presente para el monitoreo de CH₄ en Argentina, y en particular, en la cuenca Neuquina, se decidió evaluar en este trabajo final los datos provistos por los sensores SCIAMACHY, TANSO y TROPOMI para todo el período de tiempo disponible (2002-2020). Para ello, se trabajó con una metodología de ciencia de datos, basada en el proceso que se indica en la **Fig. 12**:

Figura 12

Diagrama de flujo de datos



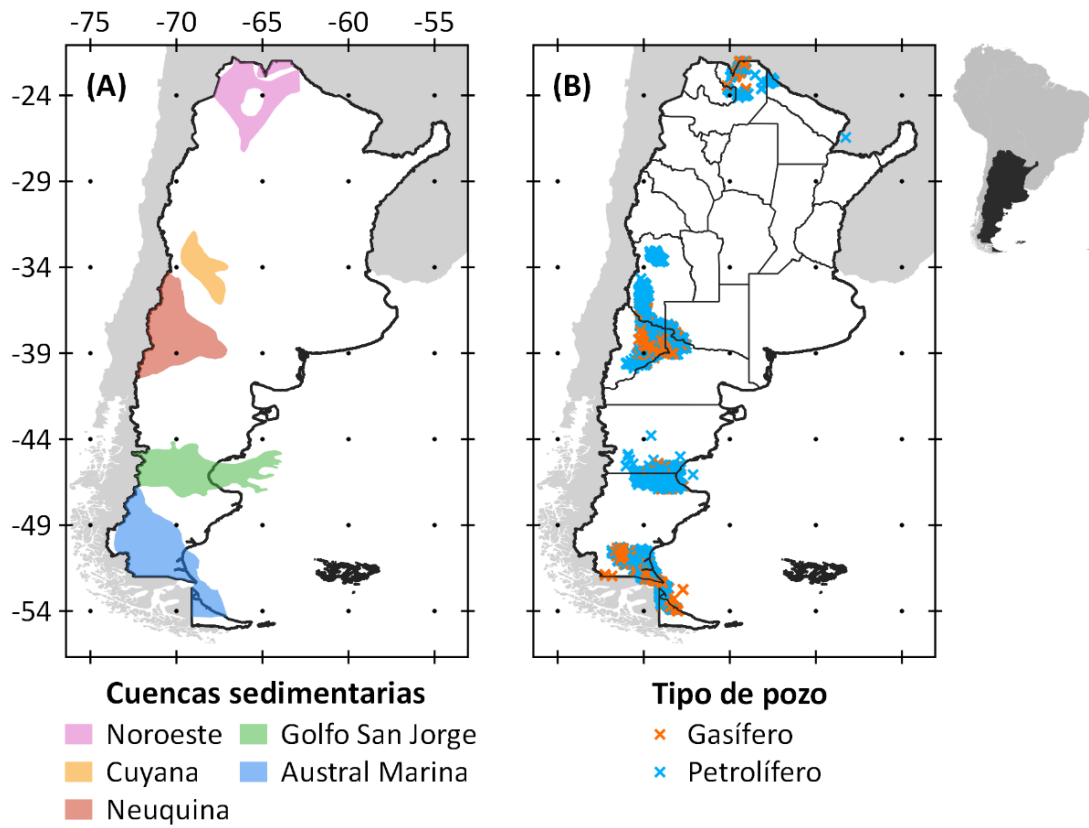
En esta sección se describen los dominios de trabajo empleados. Se detallan las características de los productos utilizados y el preprocesamiento de los mismos para obtener datos con la calidad suficiente para realizar un análisis cuantitativo de las variaciones de CH₄. Finalmente, se describen los procedimientos realizados para el análisis estadístico y temporal del CH₄ en la región.

4.1. Área de estudio

Argentina cuenta con 19 cuencas sedimentarias, de las cuales 5 (Noroeste, Cuyana, Neuquina, Golfo San Jorge y Austral) producen actualmente hidrocarburos (**Fig. 13.A**). Los pozos de extracción de gas y petróleo se encuentran distribuidos en diferentes regiones del país, abarcando parte de las cuencas. El mayor conjunto se encuentra en el Golfo San Jorge (12871) entre las provincias de Chubut y Santa Cruz, seguido por la cuenca Neuquina (12501) y la cuenca Austral (478) entre Santa Cruz y Tierra del Fuego, con algunos pozos offshore (costa afuera) (**Fig. 13.B**).

Figura 13

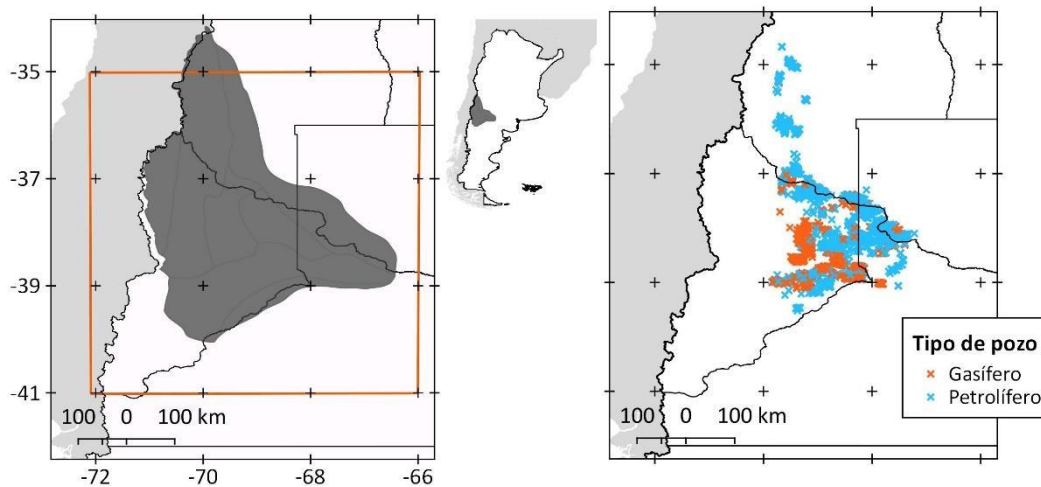
Dominio de trabajo para SCIAMACHY y TANSO-FTS



Nota. (A) Cuencas sedimentarias productivas de Argentina. (B) Localización de los pozos de gas y petróleo activos dentro del área de interés. Fuente de los datos: (Secretaría de Gobierno de Energía).

Para el desarrollo de este trabajo se definieron dos áreas de interés (AOI, por sus siglas en inglés) con el objetivo de evaluar los niveles de CH₄ a escala regional y local. A nivel regional, se trabajó con un área que abarca el total del territorio argentino (**Fig. 13**). Para el análisis a escala local se seleccionó la cuenca Neuquina, localizada al este de los Andes en la Patagonia Argentina (**Fig. 14**).

Figura 14
Cuenca Neuquina



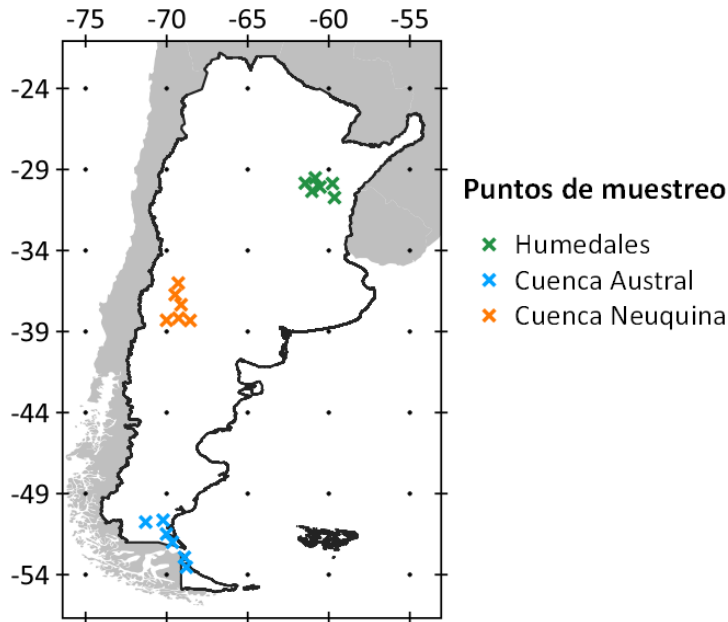
Nota. Dominio de trabajo empleado para los datos de TROPOMI (recuadro naranja). A la izquierda, extensión de la cuenca Neuquina (en gris). A la derecha, ubicación de los pozos activos dentro de la cuenca. Fuente de los datos: (Secretaría de Gobierno de Energía).

La cuenca abarca principalmente la provincia de Neuquén, extendiéndose también por las provincias de La Pampa, Río Negro y Mendoza, con un área superior a los 120000 km². Actualmente, el 42% de la producción de petróleo y el 55% de la producción de gas del país provienen de yacimientos ubicados en esta cuenca (Secretaría de Gobierno de Energía, 2019). Los pozos de extracción de hidrocarburos no se distribuyen homogéneamente dentro de la cuenca, encontrándose mayoritariamente en la mitad este de la provincia de Neuquén, ocupando parte de Río Negro y el suroeste de Mendoza, tal como puede observarse en la **Figura 14**.

Para evaluar la variación del CH₄ se tomaron puntos de muestreo en tres zonas diferentes dentro del AOI regional (Argentina): 6 puntos en la cuenca Neuquina, 6 puntos en la cuenca Austral y 6 puntos sobre los humedales del Paraná (**Fig. 15**). El objetivo de este muestreo fue contrastar el comportamiento temporal del CH₄ entre las distintas zonas para detectar diferencias inter e intra anuales. Los sitios se seleccionaron por estar distribuidos a lo largo de la extensión latitudinal del país. En ausencia de fuentes, es de esperar que los niveles de CH₄ bajen de norte a sur debido al efecto del gradiente latitudinal.

Figura 15

Puntos de muestreo para el análisis de los niveles de CH₄

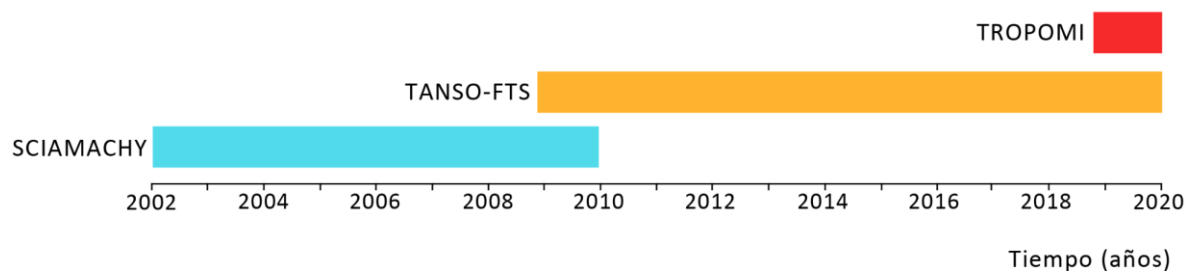


4.2. Fuentes de datos analizadas

Los datos analizados provienen de los sensores SCIAMACHY, TANSO-FTS y TROPOMI, los cuales estuvieron operativos en distintos períodos de tiempo (**Fig. 16**). En este trabajo se emplearon las observaciones de SCIAMACHY desde 2002 hasta 2009. A partir de ese año, se continuó el análisis con las mediciones del sensor TANSO-FTS, abarcando un período de 10 años comprendidos entre 2009-2020. Los datos de TROPOMI, desde fines de 2018 hasta 2019 inclusive, se utilizaron para evaluar este último año en mayor detalle.

Figura 16

Períodos de análisis con cada sensor



Los productos de CH₄ de los sensores SCIAMACHY y TROPOMI corresponden al Nivel 2 de procesamiento, mientras que el producto de TANSO-FTS es de Nivel 3. A continuación, se describen en detalle cada uno de los productos y sus características.

4.2.1. SCIAMACHY/ENVISAT

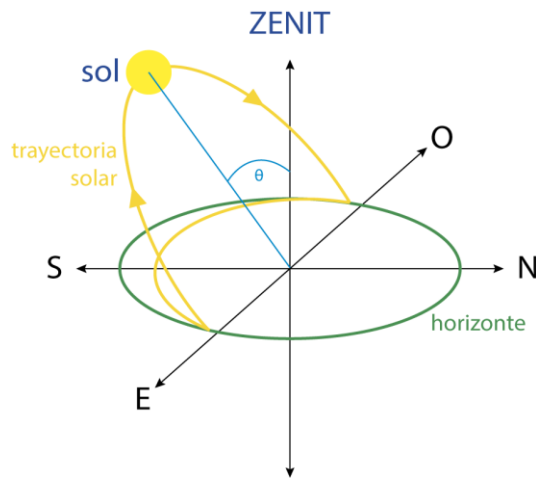
El SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartography (SCIAMACHY) fue un sensor a bordo del satélite ENVISAT (ENVironmental SATellite) de la Agencia Espacial Europea (ESA) que estuvo operativo desde 2002 hasta abril de 2012. Este sensor fue diseñado para medir la luz del sol transmitida, reflejada y dispersada por la atmósfera terrestre empleando 8 canales espectrales individuales entre los 240 y los 2380 nm, cubriendo el UV, el visible y el NIR (Near Infra Red). Los tres canales en el NIR (canal 6: 1000-1750 nm, canal 7: 1940-240 nm y canal 8: 2265-2380 nm) posibilitaron por primera vez las mediciones globales de CH₄, CO₂, NO_x y CO (Gottwald y Bovensmann, 2014).

SCIAMACHY alternaba entre distintas geometrías de observación, o modos, siendo el modo nadir el único empleado para la medición de CH₄. El sensor cubre una escena de 960 km, en el sentido de la órbita, en una serie de escaneos hacia adelante y hacia atrás, perpendiculares a la dirección de vuelo. Entre escenas escaneadas el instrumento deja brechas sin datos que pueden alcanzar los 1600 km sobre el ecuador (Soebijanta et al., 2003). Con 14 órbitas por día, SCIAMACHY alcanzaba una cobertura global cada 6 días.

El tamaño típico de píxel en mediciones nadir es de 30 km en el sentido de la órbita (norte-sur) y entre 60-120 km en sentido perpendicular a la misma (este-oeste). La resolución espacial de este sensor depende del intervalo espectral medido y de la posición en la órbita. Para los canales 6 y 8, empleados en la recuperación de CH₄, el tamaño del píxel es de ~30x120 km², excepto a elevados ángulos solares respecto del zenit (**Fig. 17**). Esta situación se da en mediciones cerca de los polos durante el verano, allí la resolución espacial disminuye hasta los 30x240 km² (Gottwald y Bovensmann, 2014).

Figura 17

Ángulo solar respecto del zenit



Nota. Esquema de la trayectoria solar (en amarillo), y el ángulo zenital (θ).

El modelo implementado para la recuperación de CH_4 con los datos de SCIAMACHY se denomina BIRRA (Beer Infra-Red Retrieval Algorithm), y es un modelo basado en mínimos cuadrados no lineales. Este algoritmo permite recuperar la VCD de gases traza que absorben en la región NIR-SWIR, como el CH_4 , el CO , N_2O , etc. BIRRA emplea factores de escala no lineales (α) que deben ser estimados para cada uno de los gases que absorben dentro de una misma región espectral (Lichtenberg et al., 2015). En la recuperación de CH_4 estos gases son el vapor de agua y el CO_2 .

Para lidiar con el efecto de aerosoles y nubes en el camino óptico, el modelo utiliza una corrección empleando el CO_2 (**Ecuación 3**). Se asume que este gas presenta una distribución más homogénea y que sus variaciones no son significativas comparadas con las del CH_4 (Brizzi, 2016).

$$\text{VCD}_{\text{CH}_4, \text{corr}} = \text{VCD}_{\text{CH}_4, \text{ref}} * \alpha_{\text{CH}_4} / \alpha_{\text{CO}_2} \quad (3)$$

4.2.2. TANSO-FTS/GOSAT

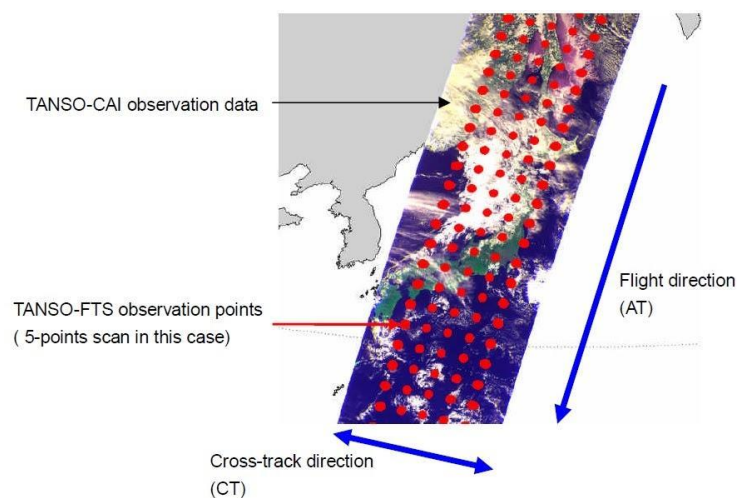
El satélite GOSAT (Greenhouse gases Observation SATellite) de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) fue puesto en órbita en 2009 y continúa operativo hasta la actualidad. GOSAT fue la primera misión del mundo dedicada únicamente a la cuantificación de las concentraciones atmosféricas de CO₂ y CH₄.

El sensor TANSO a bordo de GOSAT consiste en dos instrumentos. Uno es TANSO-FTS (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation Fourier Transform Spectrometer) que mide la radiancia en el rango del espectro electromagnético del infrarrojo de onda corta (SWIR) y la emisión terrestre en el térmico. A partir de estos espectros se recuperan las concentraciones de CH₄ y CO₂ en la columna atmosférica. El otro instrumento, el sensor TANSO-CAI (Cloud and Aerosol Imager), mide las nubes y los aerosoles dentro del campo de visión de TANSO-FTS.

En su rutina de observación, TANSO-FTS escanea de manera puntual, no continua, en dirección perpendicular al vuelo (cross-track) con 1, 3, 5, 7 o 9 puntos de observación. Esto genera un patrón de mediciones distribuidas irregularmente en el espacio y en el tiempo, con brechas o huecos entre ellas (**Fig. 18**). La geometría de observación es en modo nadir, y cada punto cubre un área de ~85 km². El satélite completa la vuelta al globo y vuelve a pasar por el mismo punto cada 3 días.

Figura 18

Esquema de observación de GOSAT



Nota. La imagen satelital de fondo corresponde a datos de TANSO-CAI, empleado para la detección de nubes. En rojo se señalan los puntos de observación de TANSO-FTS, en el modo de escaneo de 5 puntos. Adaptado

de *GOSAT / IBUKI Data Users Handbook* (p. 28), por Japan Aerospace Exploration Agency y National Institute for Environmental Studies, 2011.

La concentración de CH₄ es recuperada gracias a sus líneas de absorción entre los 1600 y los 2000 nm. El algoritmo implementado en los datos de GOSAT, denominado RemoTec, utiliza una banda de absorción del O₂ cerca de los 760 nm para estimar la presión superficial, y con ello la concentración de aire seco en la columna atmosférica (Yoshida et al., 2017). A partir de este dato, se deriva el radio de mezcla de CH₄ en aire seco (XCH₄).

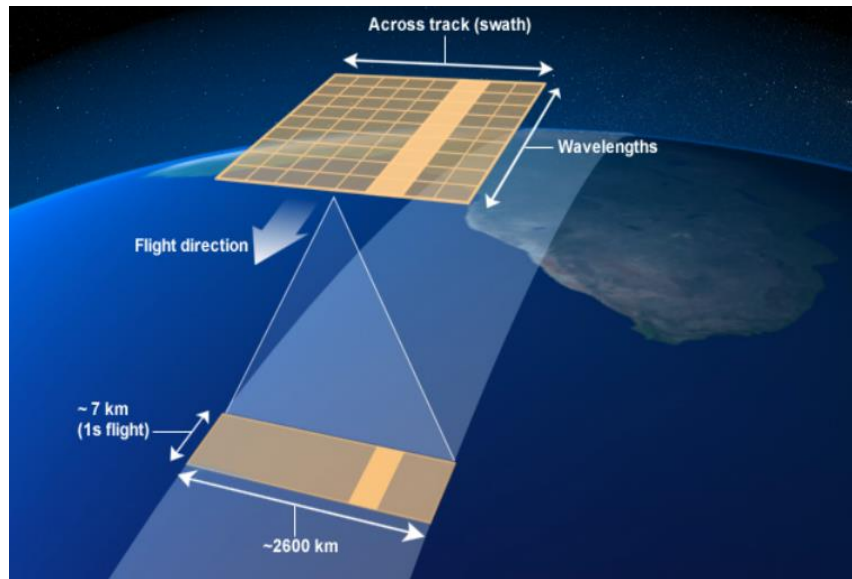
4.2.3. TROPOMI/Sentinel-5P

El sensor TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) es un espectrómetro de imagen a bordo del satélite Sentinel-5 Precursor (S5P) y cubre las bandas de longitud de onda UV y visible (270-500 nm), NIR (675-775 nm), SWIR-1 (1590-1675nm) y SWIR-2 (2305-2385 nm). Este instrumento mide la radiancia en el tope de la atmósfera empleando el modo de observación nadir. Forma parte de la Misión Copernicus de la ESA y fue lanzado en octubre del 2017.

Las bandas en el SWIR permiten la detección de CH₄ y CO, en simultáneo con el NO₂ y otros gases en la atmósfera. El sensor tiene un ancho de barrido de ~2600 km en la superficie de la Tierra (**Fig. 1**). Brinda una mejor resolución espacial que sus antecesores, con un tamaño de píxel de 7x7 km² en el SWIR que luego fue mejorado a 7x5.5 km² a partir del 6 de agosto de 2019 (Landgraf et al., 2019). El Sentinel-5P tiene un período de revisita de 1 día, permitiendo su implementación en el monitoreo diario de la contaminación atmosférica, a escala de ciudades.

Figura 19

Esquema de observación de TROPOMI



Nota. Adaptado de Sentinel-5P TROPOMI User Guide - Sentinel Online, por European Space Agency, (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-5p-tropomi>).

El algoritmo de recuperación del instrumento TROPOMI está basado en el modelo RemoTec aplicado para TANSO (Butz et al., 2010; Butz et al., 2011). Como se mencionó, este modelo emplea la banda A del oxígeno alrededor de los 760 nm (en la banda del NIR, 757-774 nm) y la banda de absorción del CH₄ en el SWIR (2305-2385 nm) para recuperar el XCH₄.

4.3. Obtención de los datos y preprocesamiento

El objetivo del preprocesamiento es habilitar las mediciones para su análisis, esto requiere la obtención de datos, su evaluación en función de los criterios de calidad recomendados por los organismos generadores, recorte dentro del área de estudio y proyección en una grilla regular para una fácil interpretación. Dado que los tres productos satelitales poseen diferentes estructuras de datos y los formatos de los archivos son distintos, cada uno requirió un preprocesamiento particular adaptado a sus características.

4.3.1. SCIAMACHY/ENVISAT

Para analizar la evolución histórica del CH₄, se descargaron las mediciones de SCIAMACHY desde agosto de 2002 hasta diciembre de 2009 inclusive, año en el que comenzaron las mediciones de GOSAT. Se descargaron 35804 archivos en formato N1 con el producto de Nivel 2 en su última versión (6.01). Los archivos se descargaron desde la plataforma Earth Online de la ESA, vía cliente FTP (File Transfer Protocol).

La estructura de los archivos de Nivel 2 de SCIAMACHY está ordenada jerárquicamente y contiene 53 niveles de información, 47 con información sobre los gases medidos (CH₄, NO₂, O₃, CO, entre otros) y uno sobre las nubes y los aerosoles. Los otros niveles contienen información relacionada con la geolocalización de las medidas en las diferentes geometrías de observación. Además, los archivos incluyen un encabezado con los metadatos del producto general (nombre, fecha de inicio y final de la órbita, n° de órbita, tiempo en UTC, entre otros) y un encabezado específico (latitud y longitud de inicio y final, ventana de medición de cada gas, etc.). Los datos georeferenciados están en coordenadas geográficas (°) bajo el Sistema de Referencia de Coordenadas WGS84.

El conjunto de datos con las mediciones de CH₄ tiene el nombre de `nad_ir1_ch4` y contiene dentro 28 niveles. El nivel 6 presenta la Densidad de CH₄ en la Columna Vertical (VCD) en unidades de moléculas/cm², y corresponde únicamente al modo nadir de medición. En este trabajo se utilizó la VCD corregida con el CO₂ como proxy (**Ecuación 3**).

El nivel 8 dentro del conjunto de datos para el CH₄ contiene la información que describe la calidad de la medición. Esta entrada consiste en un número entero que representa un número binario de 16 bits. Cada bit indica si se cumple o no un criterio dado de calidad, según un indicador binario (True = 1, False = 0). Los bits deben ser interpretados siguiendo la convención Big Endian (Cardaci, 2015). En este estudio se trabajó con los bits 15 y 14, que indican, respectivamente, si la convergencia del modelo fue alcanzada y si el ángulo solar respecto del zenit está dentro de los límites recomendados (< 80°) (Brizzi, 2016).

También, se empleó la información del nivel 17 que contiene los errores en los factores de escala no lineales (α) de cada gas empleado en el modelo. Las tres primeras entradas de este campo representan los errores en los factores de CH₄, CO₂ y H₂O respectivamente. En paralelo, se usó la información de nubes y aerosoles

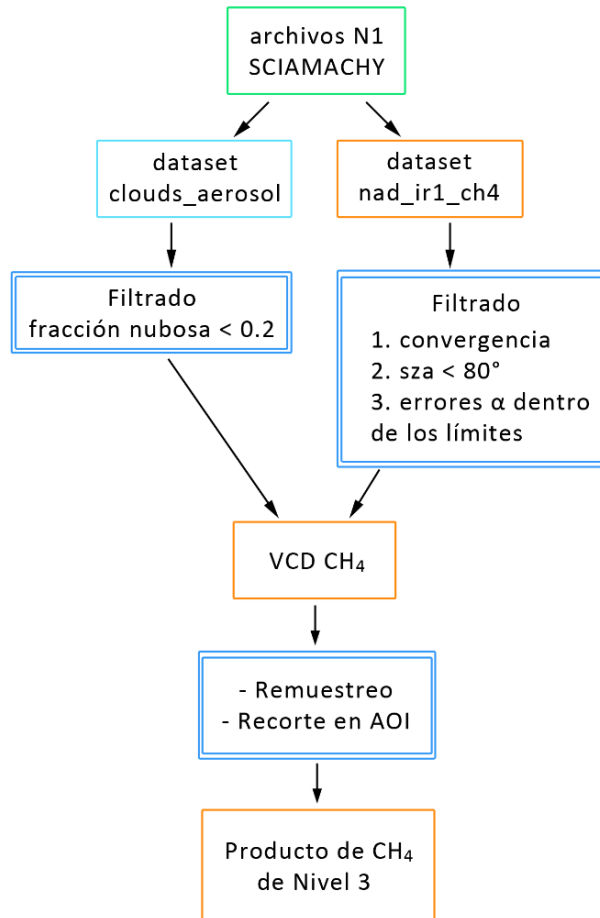
(`clouds_aerosol`) para filtrar aquellas mediciones que tuvieran cobertura nubosa por encima del máximo recomendado (< 20%) (SCIAMACHY Quality Working Group).

Los archivos en formato N1 se procesaron con el lenguaje de programación Python, utilizando las librerías *CODA*, *HARP* y *rasterio* (Sanucci, 2021a). El pre-procesamiento para generar los productos de Nivel 3 con la VCD de CH₄ (**Fig. 20**) de estos archivos consistió en:

1. Filtrar los archivos con órbitas sobre el área de interés;
2. Seleccionar el dataset correspondiente al CH₄;
3. Filtrar únicamente medidas en sentido hacia adelante (forward);
4. Aplicar los filtros de calidad recomendados por el (SCIAMACHY Quality Working Group):
 - Convergencia del modelo alcanzada;
 - Ángulo solar respecto del zenit (*sza*) < 80°;
 - Fracción de nubes < 0.2;
 - Errores $\alpha(\text{CH}_4)$, $\alpha(\text{CO}_2)$, $\alpha(\text{H}_2\text{O})$ positivos;
 - Error $\alpha(\text{CO}_2)$ < 0.005;
 - Error $\alpha(\text{CH}_4)$ < 0.01;
 - Observaciones únicamente sobre tierra;
5. Realizar un promediado espacial para proyectar las mediciones en una grilla uniforme de latitud y longitud, con un tamaño de píxel de 50x50 km² (remuestreo);
6. Recortar dentro del área de Argentina;
7. Guardar en formato GeoTIFF.

Figura 20

Diagrama de preprocesamiento para el producto de Nivel 2 de SCIAMACHY



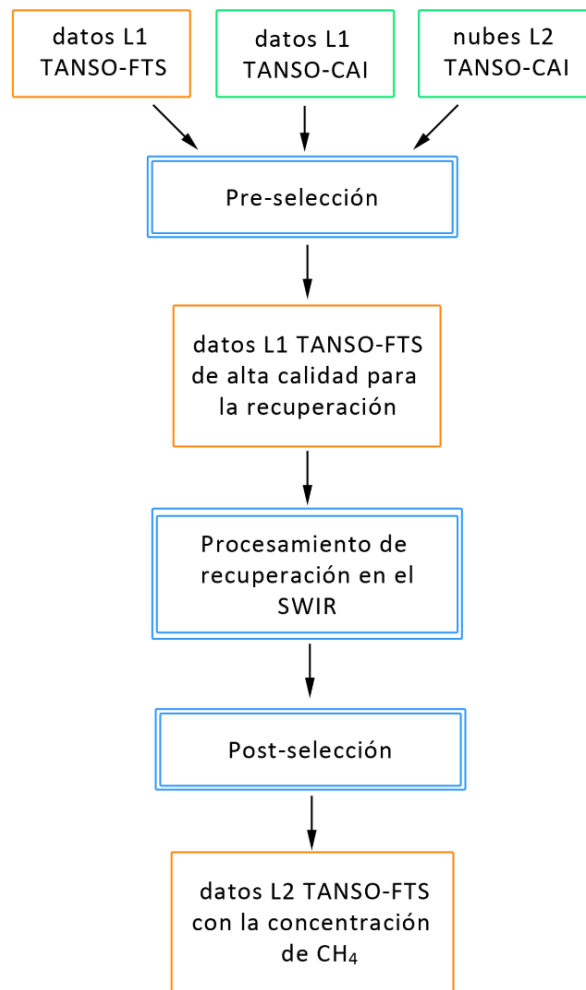
4.3.2. TANSO-FTS/GOSAT

Desde el GOSAT Data Archive Service (GDAS) del National Institute of Environmental Studies (NIES) se descargaron 129 archivos en formato HDF5 con el producto de Nivel 3 *bias corrected* en su versión 2.95. Estos archivos contienen la distribución global de CH₄ corregida respecto de los datos de validación, entre junio de 2009 y mayo de 2020 inclusive. Los datos tienen un sesgo negativo entre el 1-2% respecto de los datos de la red TCCON (Japan Aerospace Exploration Agency y NIES, 2011). La corrección del sesgo emplea parámetros auxiliares recuperados por el sensor, los cuales permiten compensar las dependencias del producto con diferentes factores, como el albedo superficial o la presencia de aerosoles.

A diferencia que en el caso de SCIAMACHY, los datos de GOSAT fueron preprocesados por el NIES en diferentes etapas (**Fig. 21**) para generar productos disponibles al público con la calidad pretendida.

Figura 21

Flujo de procesamiento realizado por el NIES



La primera etapa de preprocesamiento realizada por el NIES consiste en una pre-selección de los datos de Nivel 1 para obtener datos espectrales con calidad adecuada para la recuperación de CH₄ y CO₂. En esta instancia el criterio de filtrado es el siguiente (NIES, 2019):

1. Ángulo solar respecto del zenit $\leq 70^\circ$;
2. Cobertura de nubes del 0% dentro del campo de visión del sensor FTS;
3. Datos libres de nubes y/o aerosoles en altitudes extremas;
4. Datos con alta calidad espectral;
5. Datos con fracción de suelo $\geq 60\%$, o únicamente océano, dentro del campo de visión del sensor.

El algoritmo para la recuperación de CH_4 se aplica a los datos de Nivel 1 que pasaron la pre-selección. Posteriormente, el NIES realiza un segundo filtrado (post-selección) de los datos de Nivel 2 que cumplan las siguientes condiciones (NIES, 2019):

1. Número de iteraciones < 20 ;
2. Grados de libertad de la señal ≥ 1.0 ;
3. Cuadrado medio del espectro residual < 1.3 para CH_4 ;
4. AOT (espesor óptico de los aerosoles) ≤ 0.1 ;
5. Para observaciones sobre tierra, albedo ≤ 1.0 (Wunch et al., 2011);
6. Desviación de la presión superficial recuperada respecto de su valor a priori ≤ 20 hPa.

Este producto Nivel 2 contiene el número de moléculas de CH_4 en una columna entre la superficie de la Tierra y el tope de atmósfera, por unidad de área, es decir, la VCD de CH_4 . El ratio de mezcla en la columna total, XCH_4 , fue generado por el NIES a partir de dividir la VCD de CH_4 por la VCD del aire (Yoshida et al., 2017). Esta última se obtuvo con la presión superficial estimada a partir de la banda de absorción del O_2 cerca de los 760 nm, mediante el modelo RemoTec. En general, los datos recuperados de CH_4 representan el 2-3% del total de observaciones (Japan Aerospace Exploration Agency y NIES, 2011).

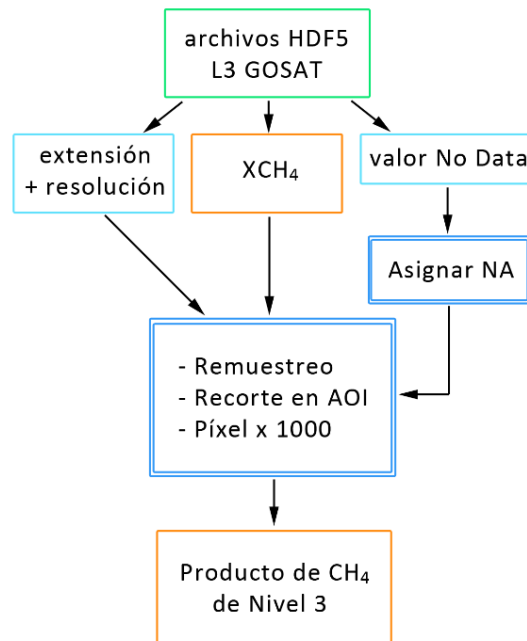
Finalmente, el producto de Nivel 3 de GOSAT fue generado por el NIES a partir del XCH_4 de Nivel 2, mediante interpolación espacial con el método de kriging, extrapolación y suavizado. La interpolación no incluye a los puntos de observación con valores extremadamente diferentes al de sus vecinos más cercanos. Este proceso es repetido hasta que los datos de Nivel 2 se acercan a una distribución normal (Yoshida et al., 2017). De esta forma, los archivos de Nivel 3 contienen el XCH_4 normalizado respecto a la columna de aire seco, en unidades de ppm y promediado mensualmente. Los datos están proyectados en una grilla regular bajo el Sistema de Referencia WGS84, con una resolución espacial de $250 \times 250 \text{ km}^2$.

En este trabajo, los archivos en formato HDF5 con el producto de Nivel 3 de CH₄ se procesaron con el lenguaje de programación R, utilizando las librerías *rhfd5*, *raster* y *rgdal* (Sanucci, 2021b) (**Fig. 22**). Dada la calidad de los datos de GOSAT, el preprocesamiento para estos archivos consistió en:

1. Generar una grilla regular de latitud y longitud con la extensión máxima y mínima de cada archivo, manteniendo la resolución espacial original;
2. Extraer el valor utilizado como No Data (sin datos) = -9999;
3. Extraer los datos de CH₄ y transponer la matriz para reordenar filas y columnas;
4. Asignar el valor NA a aquellas celdas sin datos;
5. Generar un archivo ráster con los datos de CH₄, la proyección empleada (WGS84) y la grilla de latitud y longitud;
6. Recortar el ráster al área de Argentina;
7. Multiplicar el valor del píxel por 1000 para convertir ppm a ppb.

Figura 22

Diagrama de preprocesamiento para el producto de Nivel 3 de GOSAT



4.3.3. TROPOMI/Sentinel-5P

TROPOMI publica las mediciones de CH₄ desde el 28 de noviembre de 2018. A partir de esta fecha y hasta el 31 de diciembre de 2019 inclusive, se descargaron los productos Nivel 2, conformando un total de 1318 archivos NetCDF. Los archivos se descargaron desde la plataforma Mundi Web Services que forma parte de los Servicios de Acceso a Información y Datos de la Misión Copernicus de la ESA (DIAS, por sus siglas en inglés).

El producto de Nivel 2 contiene el radio de mezcla de CH₄ (XCH₄) normalizado respecto a la columna de aire seco, en unidades de ppb. Los datos tomados originalmente tienen un sesgo negativo de 0.3% comparados contra 22 estaciones de la red TCCON (Landgraf et al., 2019). Este sesgo fue corregido por el Netherlands Institute for Space Research durante la generación del producto Nivel 2, empleando los datos de GOSAT como referencia (Hasekamp et al., 2019). Los resultados de la campaña de validación muestran una mejora en la concordancia con las medidas en tierra de la red TCCON (sesgo de -4.3 ± 7.4 ppb), frente a los datos sin corregir (sesgo de -12 ± 11.5 ppb) (Landgraf et al., 2019).

Para la generación del producto de Nivel 2 de TROPOMI, el equipo técnico del S5P realiza un filtrado de los datos (pre-selección) de modo que sólo las mediciones que cumplan los siguientes criterios están disponibles al público:

1. Intensidad espectral superior al nivel umbral. Una albedo mínima de 0.02 en el SWIR resulta necesaria para la exactitud de la recuperación de CH₄;
2. Mediciones únicamente sobre tierra;
3. Sin cobertura nubosa. Se emplea la máscara de nubes generada por el sensor VIIRS, regrillada para los datos de TROPOMI;
4. Ángulo solar respecto del zenit $< 70^\circ$;
5. Exclusión de áreas montañosas. Se filtran todos los píxeles con rugosidad de la superficie (desviación estándar de las altitudes) superior a 75 m (obtenida de la Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 - GMTED2010);
6. Ángulo del instrumento respecto del zenit $< 60^\circ$, se da preferencia a aquellos píxeles que están cerca del nadir del instrumento.

La recuperación de CH₄ para un dado grupo de píxeles se realiza sólo si el número de píxeles que cumplen los criterios de selección enumerados es superior al 70%.

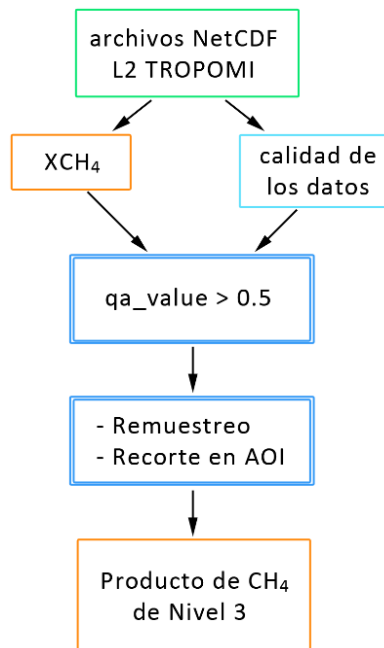
Los archivos de Nivel 2, en formato NetCDF, están organizados jerárquicamente, un nivel muestra los metadatos y otro los valores. Este último posee 15 niveles, entre ellos, los datos del radio de mezcla de CH₄ con corrección del sesgo (`ch4=bias_corrected`) que se utilizó en este trabajo. Otros niveles contienen datos que fueron usados de soporte, como los límites de latitud y longitud para realizar el grillado del producto de Nivel 3. El parámetro `qa_value` resume las señales de procesamiento en un valor continuo que varía entre 0 (sin convergencia, ausencia de datos) y 1 representando la máxima calidad de la medición (Apituley et al., 2017).

El preprocesamiento de este producto de Nivel 2 se realizó utilizando las librerías *HARP* y *raster* en R (Sanucci, 2021a) (**Fig. 23**). El flujo de trabajo consistió en las siguientes etapas:

1. Filtrar archivos con órbitas sobre el área de interés;
2. Seleccionar el dataset `ch4=bias_corrected`;
3. Filtrar aquellos datos con un nivel de calidad (`qa_value`) superior a 0.5 según recomendaciones de la ESA (Apituley et al., 2017). Este valor asegura que las condiciones que afectan la calidad de los píxeles (enumeradas más arriba) están dentro de los límites recomendados;
4. Realizar un promediado espacial para proyectar las mediciones en una grilla uniforme de latitud y longitud, con una resolución espacial de 1x1 km² (remuestreo);
5. Recortar los datos al área de estudio dentro de la cuenca Neuquina;
6. Guardar en formato GeoTIFF.

Figura 23

Diagrama de preprocesamiento para el producto Nivel 2 de TROPOMI



4.4. Análisis

4.4.1. Construcción de estadísticos resúmenes para cada producto satelital

A partir de los productos de Nivel 3, se generaron mapas con estadísticos mensuales y anuales para el período de tiempo estudiado con cada sensor. Los mapas anuales se realizaron únicamente con años completos de mediciones. Además, se construyeron mapas para cada uno de los meses, desde enero a diciembre, empleando datos promediados entre varios años en función del instrumento. Los estadísticos evaluados fueron, en todos los casos, la media, la mediana, la desviación media absoluta (MAD), el mínimo, el máximo y el número de datos para cada píxel (N).

La baja resolución espacial del sensor SCIAMACHY, con un tamaño de píxel de 30x120 km², limita las posibilidades de realizar un análisis espacial a escala local en la cuenca Neuquina. Por lo tanto, los datos de SCIAMACHY se emplearon para generar mapas a escala regional, abarcando el total del territorio nacional. Se construyeron mapas con estadísticos mensuales y anuales utilizando los archivos Nivel 3 comprendidos entre 2003 y 2009. El año

2002 no se incluyó dado que se encontraba incompleto. Los niveles de CH₄ sobre la cuenca Neuquina se compararon con los niveles sobre los sitios de humedales y la cuenca Austral, a partir de los puntos de muestreo.

Por otro lado, el producto de Nivel 3 del sensor TANSO-FTS corresponde a promedios mensuales. Con los datos de este instrumento se generaron únicamente mapas con estadísticos anuales. Al igual que con los datos de SCIAMACHY, debido a la baja resolución espacial de TANSO-FTS (250 km²) el análisis espacial se realizó a escala nacional. Del mismo modo, los niveles de CH₄ en la cuenca Neuquina se contrastaron con las concentraciones en los otros dos sitios muestreados, humedales y cuenca Austral.

Respecto a los datos del sensor TROPOMI, debido a que este instrumento está activo recién desde fines del 2018, solo se analizó el año 2019, para el cual se construyeron mapas anuales y mensuales. El análisis espacial de las concentraciones de CH₄ medidas por el sensor TROPOMI, con una resolución espacial del orden de los km, se realizó a escala regional, abarcando el total del país, y a escala local, focalizando en la cuenca Neuquina.

4.4.3. Análisis de la serie temporal de CH₄ durante 2009-2020

La evaluación de una serie de tiempo univariada requiere al menos 4 años de observaciones. Por esta razón, para analizar la serie temporal de los niveles de CH₄ en la cuenca Neuquina se utilizaron las mediciones de GOSAT, siendo las únicas que cumplen esta condición. Para ello, se abarcó el mayor período de tiempo posible con años completos de mediciones satelitales de CH₄ (2010-2019).

Como primer paso de este análisis, se determinó la presencia de datos faltantes. Los mismos se imputaron empleando una media móvil ponderada lineal, calculada a partir de 6 observaciones alrededor de cada valor faltante (3 antes y 3 después). A cada observación se le asignó un peso que disminuye aritméticamente con la distancia temporal. Es decir, a aquellas observaciones directamente al lado del valor central se les asigna un factor de 1/2 a cada una, las observaciones siguientes se les asigna 1 / 3, y a las más lejanas 1/4. Esta decisión está basada en la mayor relación que presentan las mediciones cercanas sobre el valor faltante.

La serie de tiempo sin valores faltantes se separó en sus componentes constituyentes: la tendencia, la estacionalidad y el error aleatorio. La tendencia muestra el cambio global en los niveles de CH₄ durante el período estudiado, la estacionalidad refleja

la variación cíclica del CH₄ a lo largo de los meses, y el error aleatorio refiere a cambios o variaciones que no son explicadas por la tendencia o la estacionalidad.

Para la descomposición de la serie temporal se aplicó un modelo aditivo (**Ecuación 4**), empleado en referencias bibliográficas (Belikov et al., 2019; Khalil and Rasmussen, 1990). En la ecuación, T(t) representa la tendencia, S(t) la estacionalidad y e(t) el error aleatorio.

$$Y(t) = T(t) + S(t) + e(t) \quad (4)$$

Para el cálculo de la pendiente en la tendencia del CH₄ se empleó el estimador no paramétrico Theil-Sen. Este estimador permite ajustar de manera robusta una recta a puntos muestrales en el plano (regresión lineal simple) eligiendo la mediana de las pendientes de todas las líneas entre pares de puntos.

5. Resultados y discusión

En esta sección se describen los resultados obtenidos a partir del procesamiento de las mediciones de los sensores SCIAMACHY, TANSO y TROPOMI. Los resultados se presentan distribuidos en tres períodos de análisis acordes al tiempo en que cada instrumento estuvo operativo.

Se presentan en primera instancia los resultados generales del pre-procesamiento, se evalúa la pérdida de datos y el producto de Nivel 3 obtenido para los sensores SCIAMACHY y TROPOMI. Luego, se analiza la distribución de las concentraciones anuales de CH₄, identificando las áreas que presentaron los máximos niveles. Se evalúa también la distribución espacial de la MAD (Desviación Media Absoluta) y del número de observaciones para cada año. Este análisis se repite a escala mensual, para ello se evaluó el total de meses promediados entre los años analizados con cada sensor.

Con los datos de SCIAMACHY y GOSAT, se analizaron las diferencias en los niveles de CH₄ y su variación temporal entre tres sitios de muestreo: cuenca Austral, cuenca Neuquina y humedales sobre el río Paraná. Luego, en la sección de GOSAT, se presenta el análisis de la serie temporal y la tendencia del CH₄ sobre la cuenca Neuquina.

Finalmente, se presenta el análisis espacial a escala local en la cuenca Neuquina. Se evaluaron los niveles anuales y mensuales durante 2019, su variación y la cantidad de observaciones correspondiente. A partir de lo observado, se evaluó el producto diario de CH₄ generado por TROPOMI para enero de 2019, que permitió localizar valores extremos de concentración (>2000 ppb) dentro de la cuenca.

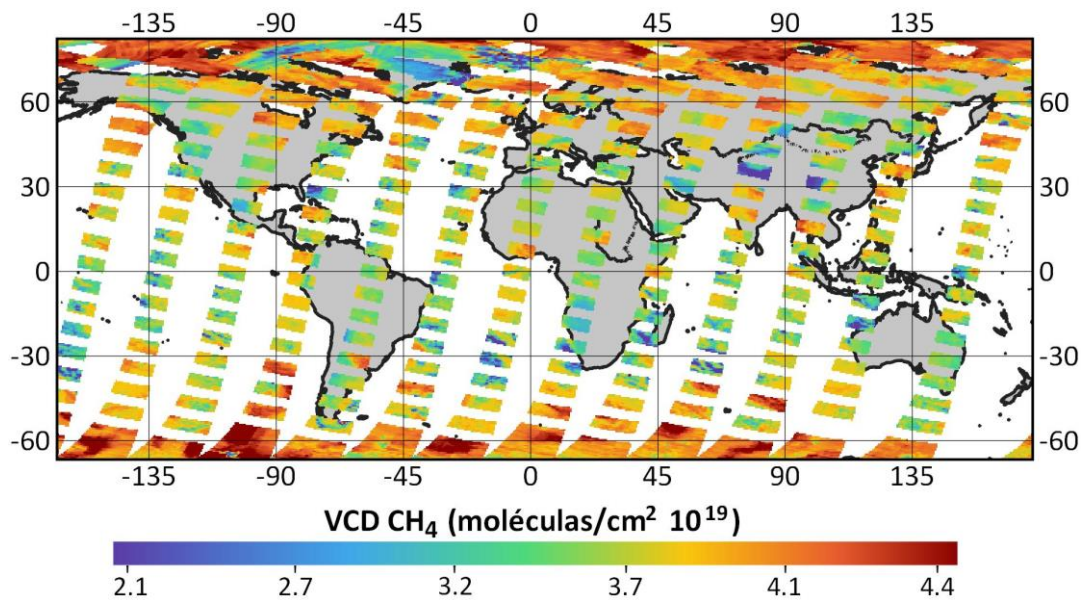
5.1. SCIAMACHY/ENVISAT

Los primeros datos que se procesaron fueron las imágenes del sensor SCIAMACHY a bordo del satélite ENVISAT para el período 2002-2009. Tras el pre-procesamiento para generar los productos de Nivel 3, quedaron 3224 imágenes diarias, correspondiendo al 10% del total de datos procesados. Esta diferencia se debe a que los archivos descargados corresponden a todo el globo y a todos los gases medidos por este sensor.

Como representación del producto satelital global, podemos ver la **Figura 24** que muestra el producto Nivel 3 de CH₄ con las órbitas de SCIAMACHY para el 6 de septiembre de 2002. En este ejemplo se observan las órbitas diarias, proyectadas sobre una grilla regular, donde cada órbita corresponde a un producto de Nivel 3 generado en el pre-procesamiento (un total de 13 imágenes).

Figura 24

Mediciones diarias de CH₄ del sensor SCIAMACHY



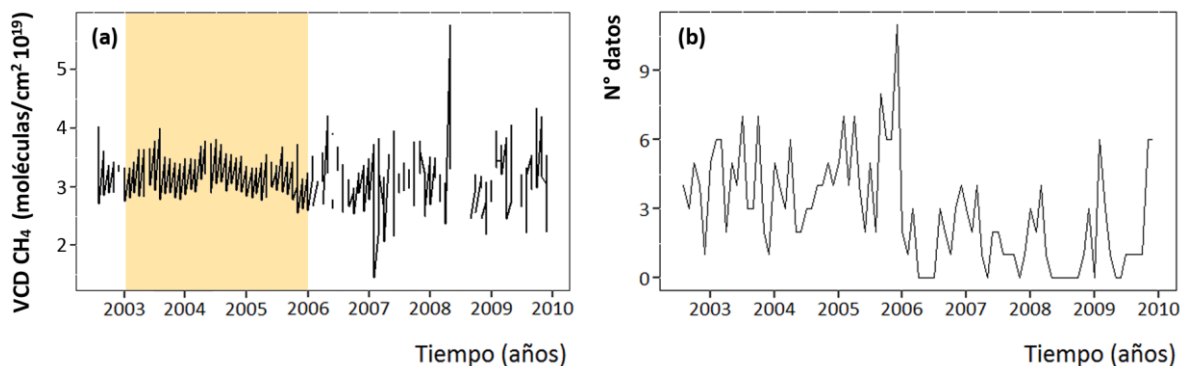
Nota. Producto Nivel 3 de CH₄ con las órbitas diarias de SCIAMACHY durante el 6 de septiembre de 2002.

Las franjas sin datos son propias de las mediciones a *nadir* de este sensor. En este modo de observación, SCIAMACHY deja sin escanear áreas que alcanzan hasta los 1500 km, provocando una gran pérdida de datos. Como las órbitas convergen en los polos, se observa allí una mayor abundancia de datos. Por el contrario, se observa una menor presencia de mediciones hacia el ecuador. Es importante resaltar que las mediciones de este sensor sobre el océano no son válidas por las características del algoritmo utilizado (SCIAMACHY Quality Working Group, 2018), que tiene un error en la recuperación de los niveles de los gases sobre los cuerpos de aguas.

La calidad del producto de SCIAMACHY se ve degradada desde fines del 2005, tal como se observa en la serie temporal de las mediciones sobre la cuenca Neuquina (**Fig. 25**), donde se ve un aumento en la dispersión de los datos y una falta de mediciones. Esto ha sido reportado por el equipo técnico de ENVISAT mediante informes técnicos, donde detallan que el daño fue el producto de una capa de hielo sobre el sensor que averió las ventanas espectrales empleadas para la recuperación de CH₄ (SCIAMACHY Quality Working Group, 2018). En consecuencia, el producto de CH₄ puede presentar una desviación dependiente del tiempo y una elevada pérdida de datos al aplicar los filtros de calidad (**Fig. 24**). En función de esto, en este trabajo se decidió evaluar únicamente los datos de SCIAMACHY hasta el año 2005 inclusive.

Figura 25

Variación temporal de los datos de SCIAMACHY



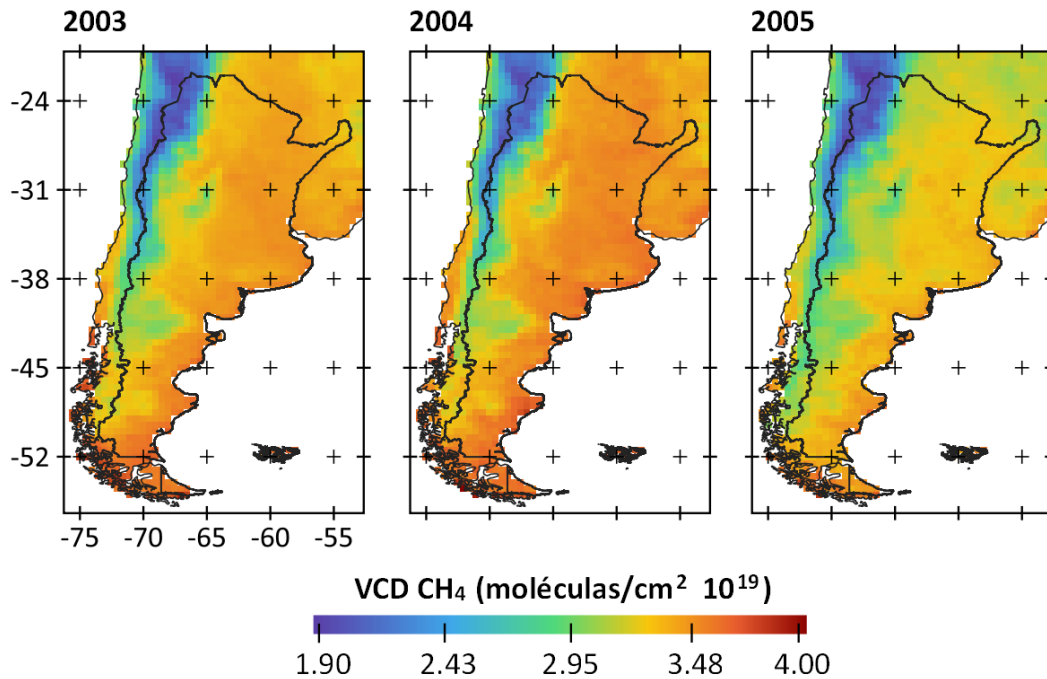
Nota. **(a)** Variación de la media mensual de CH₄ sobre la cuenca Neuquina. En naranja, período de mediciones de SCIAMACHY analizado en este trabajo (2003-2005). **(b)** Número de datos en función del tiempo para los puntos de muestreo en la cuenca.

5.1.1. Análisis de los niveles medios anuales de CH₄ sobre Argentina

Los tres años evaluados con SCIAMACHY presentan una similar distribución espacial de CH₄ dentro de Argentina (**Fig. 26**). La concentración media anual no presentó grandes variaciones entre 2003 ($3.29 \pm 0.32 \times 10^{19}$ moléculas/cm²), 2004 ($3.36 \pm 0.32 \times 10^{19}$ moléculas/cm²) y 2005 ($3.17 \pm 0.30 \times 10^{19}$ moléculas/cm²). En este período, los valores más bajos de CH₄ se presentaron en el extremo noroeste del AOI, sobre el territorio de la Puna de Atacama compartida entre Argentina y Chile (**Fig. 26**). Esta región es una altiplanicie desértica ubicada a ~ 3500 m de altitud, con una geografía producto de la intensa actividad volcánica del Holoceno y grandes salares. El comportamiento del CH₄ sobre esta región ha sido observado en estudios previos y puede atribuirse a una alta tasa de captación de CH₄ por parte de bacterias metanotróficas, que se ven beneficiadas por las condiciones ambientales de la zona (Huarte et al., 2010).

Figura 26

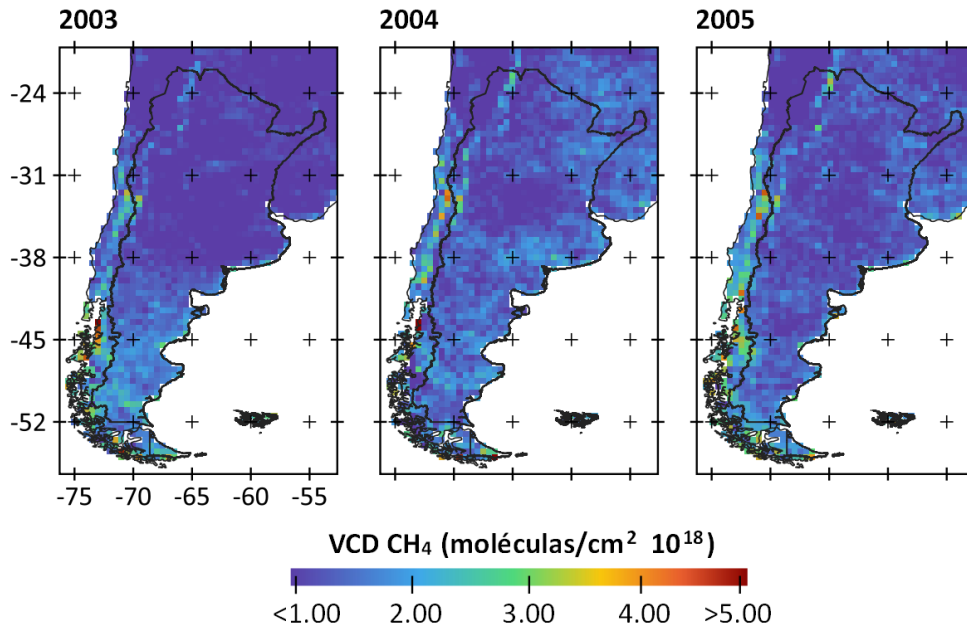
Concentración media anual de CH₄



La variación de los niveles de CH₄ a lo largo de cada año es baja (**Fig. 27**), siendo mínima en la región central del país y máxima a lo largo de la cordillera de los Andes. Durante 2003 la mayor desviación anual se presentó en la mitad sur de Argentina. En 2004 y 2005 la desviación anual fue más homogénea sobre todo el territorio. La mayor variación detectada corresponde al 2004, cuando alcanzó un valor de 5.75×10^{18} moléculas/cm². La baja dispersión de los datos respecto a los valores medios registrados es un buen indicio de la calidad de las mediciones.

Figura 27

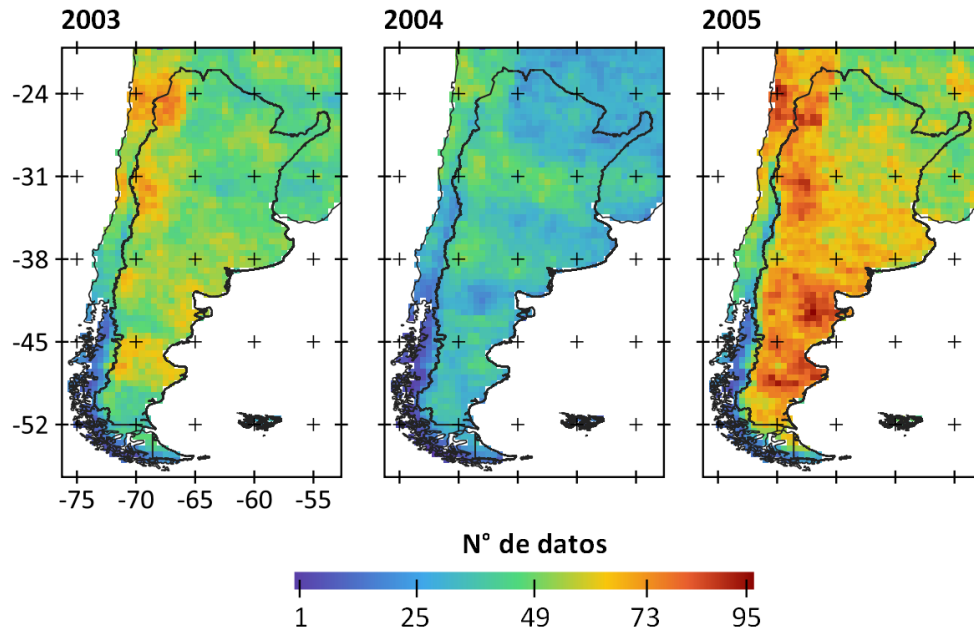
Desviación Media Absoluta (MAD) de los niveles anuales de CH₄



La **Figura 28** muestra la distribución del número de datos anuales en el territorio. Dado que las órbitas de SCIAMACHY se solapan hasta cubrir todo el globo, aquellas mediciones que tengan la calidad requerida se acumularán y en consecuencia pueden mostrar un patrón con franjas similar al de las órbitas diarias (**Fig. 24**). El año 2004 presentó la menor cantidad de datos, observando zonas con menos de 25 mediciones anuales. Por otra parte, las más altas cantidades de mediciones sucedieron en 2005, mostrando una gran acumulación de datos en sectores puntuales del dominio (franja en longitud -73°a -65°).

Figura 28

Cantidad de observaciones anuales de CH₄

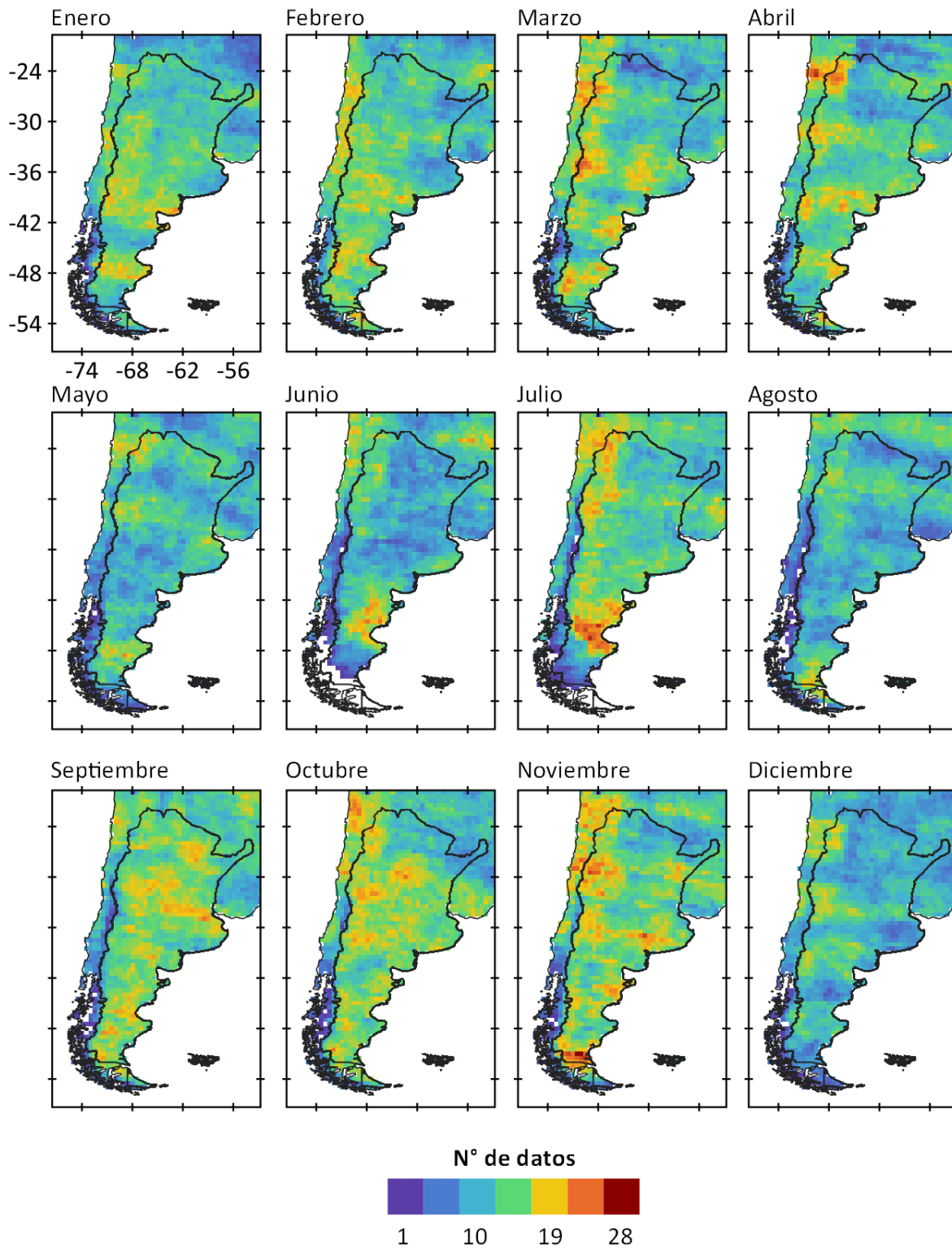


5.1.2. Análisis de los niveles medios mensuales de CH₄ sobre Argentina

Al evaluar la cantidad de observaciones para cada mes promediado entre 2003 y 2005 (**Fig. 29**), resalta un patrón de franjas con mayor cantidad de datos, tal como se vio en los mapas anuales (**Fig. 28**). Durante los meses de junio y julio el extremo austral del país presenta una alta tasa de datos faltantes (<10 por mes). Según el equipo técnico de SCIAMACHY, las observaciones diarias no deben ser utilizadas individualmente ya que contienen grandes errores debido a la degradación del sensor.

Figura 29

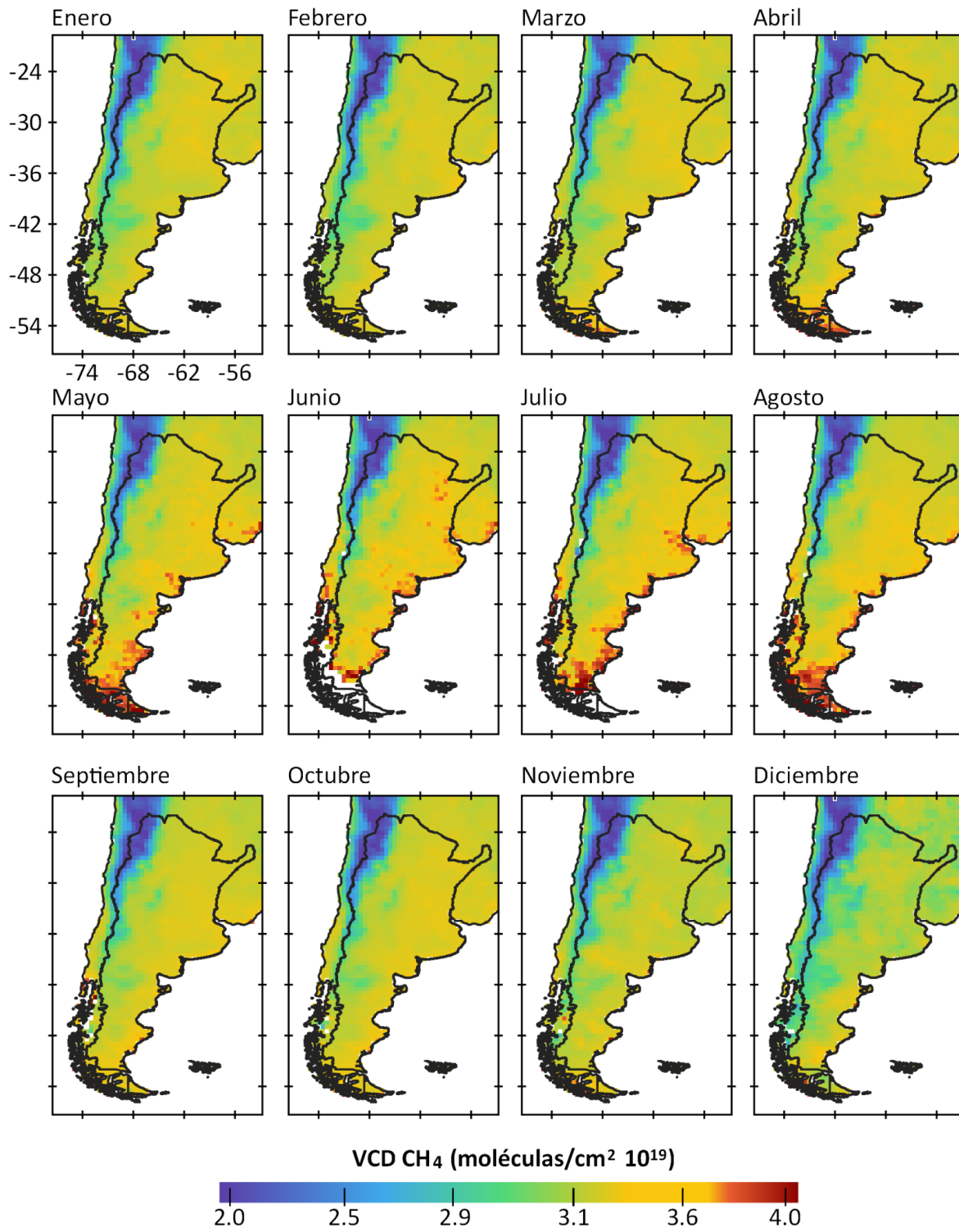
Cantidad de observaciones mensuales de CH₄ entre 2003 y 2005



Al evaluar los mapas mensuales promediados entre 2003 y 2005 se observa que los niveles más altos de CH₄ se presentaron mayoritariamente al sur, entre Santa Cruz y Tierra del Fuego, durante los meses fríos desde mayo a agosto inclusive (**Fig. 30**). En el mes de julio, la provincia de Santa Cruz presentó las mayores concentraciones medias (4.45×10^{19} moléculas/cm²). Sin embargo, las altas concentraciones que se observaron sobre esta región en estos meses corresponden a pocas observaciones. Por lo tanto, los altos niveles observados en esta fecha podrían deberse a un error del producto. Aún así, la región sureña presenta altos niveles de CH₄ durante agosto ($> 4 \times 10^{19}$ moléculas/cm²), mes que cuenta con mayor cantidad de observaciones (> 20).

Figura 30

Concentración media mensual de CH₄ entre 2003 y 2005



A su vez, resulta llamativo que estos valores son opuestos a los que se esperaría dado el gradiente latitudinal del CH₄. Estudios anteriores que evalúan la sensibilidad cercana a la superficie de las mediciones de SCIAMACHY, mencionan el potencial de este sensor para detectar GEIs en las capas más bajas de la tropósfera (Barkley et al., 2007). Dado que el efecto del gradiente latitudinal se da principalmente en la estratósfera, es factible que esta característica del sensor, junto con la presencia de fuentes emisoras de CH₄ en el sur de la Patagonia, expliquen los niveles observados.

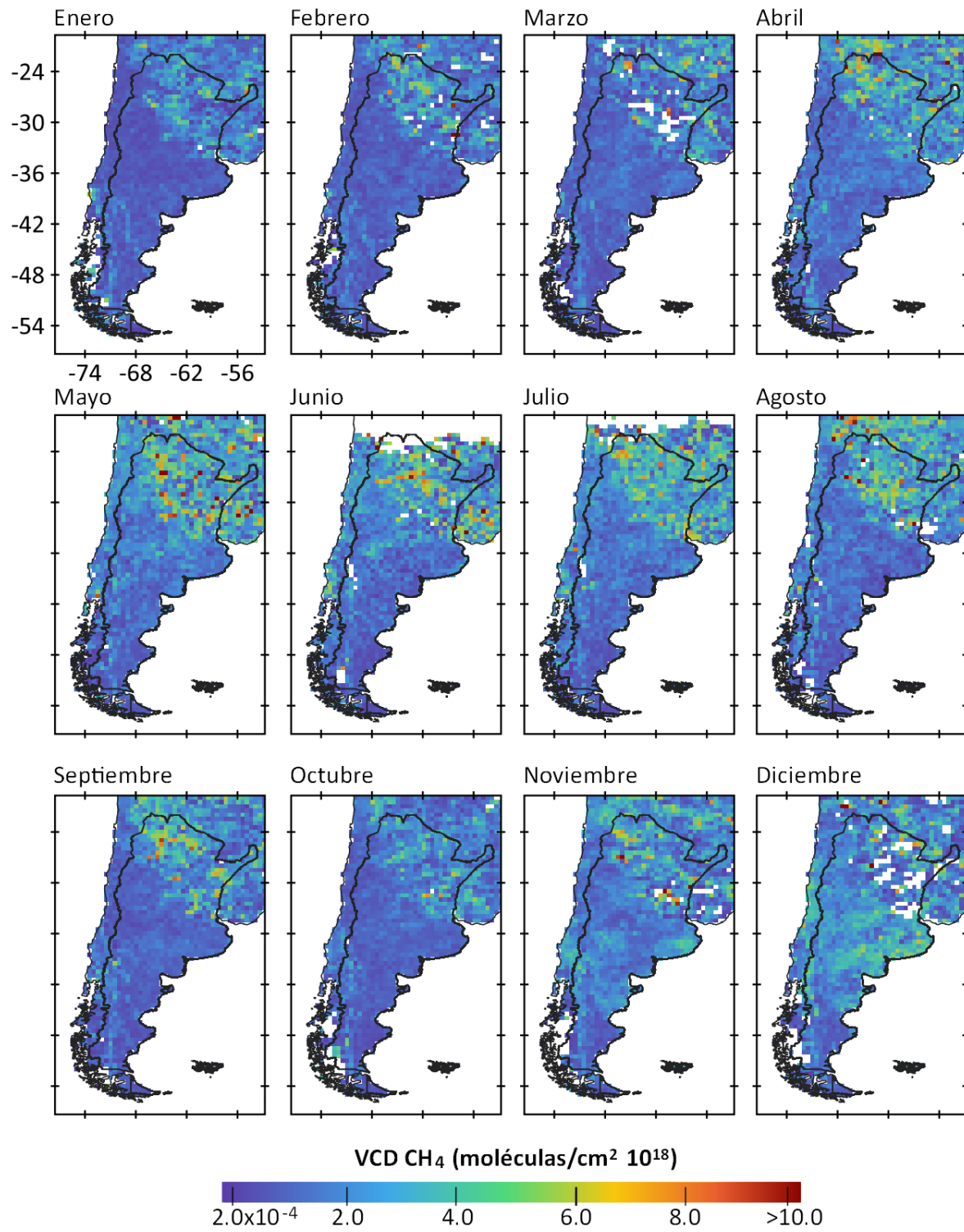
En la región sureña se encuentran diversas fuentes de CH₄, tanto antrópicas (sitios de explotación de gas y petróleo, minas de carbón), como fuentes naturales (ejemplo, las turberas (Mataloni, 2017)). Sin embargo, las altas concentraciones de este GEI en los meses de invierno no son factibles de ser atribuidas a fuentes biogénicas, ya que el CH₄ biogénico, proveniente de la actividad microbiana, tiene una relación directa con la temperatura, presentando sus máximos niveles durante la temporada cálida. También se observa un aumento en los niveles de este GEI alrededor de las ciudades de Buenos Aires y Rosario en los meses de junio y julio (**Fig. 30**).

Teniendo esto en consideración, las concentraciones de CH₄ observadas durante el invierno pueden deberse a que i) las temperaturas más bajas limitan la dispersión de los contaminantes en la atmósfera (Seinfeld y Pandis, 2006); ii) los meses fríos pueden requerir de una mayor producción de energía para calefaccionar los hogares y, en consecuencia, de un aumento de la extracción de hidrocarburos; iii) aumentan las emisiones fugitivas de la red de gas natural sobre las ciudades en la temporada fría (Urteaga, 2016); iv) el incremento en los niveles de OH• en verano, debido a la mayor incidencia de radiación solar, aumenta la tasa de remoción atmosférica.

La **Figura 31** muestra la desviación media absoluta de las concentraciones mensuales de CH₄. Se observa que la mayor variación se da en el noreste del área de estudio para todos los meses. En la región central del país, la desviación de los valores respecto de la media aumenta durante noviembre y diciembre.

Figura 31

Desviación Media Absoluta (MAD) de los niveles mensuales de CH₄ entre 2003 y 2005



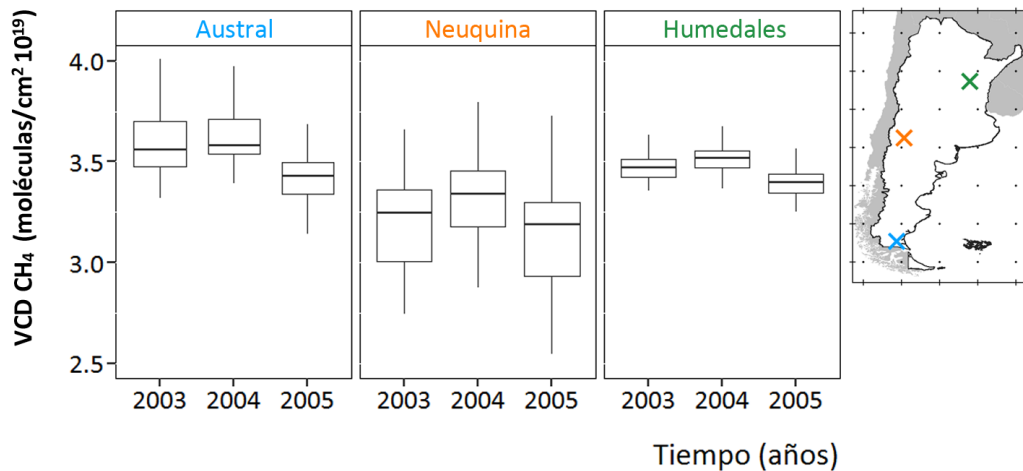
5.1.3. Comparación entre áreas de producción y humedales - SCIAMACHY

El número de observaciones anuales sobre la cuenca Austral fue de 192, mientras que en la cuenca Neuquina y los humedales fue de 215 y 213, respectivamente. Al analizar la variación de los niveles medios anuales de CH₄, no se presentaron diferencias significativas entre los sitios muestreados (**Fig. 32**). Esto coincide con lo esperado según la bibliografía (Blake, 2013). Sin embargo, se observa una disminución leve de las concentraciones de CH₄ durante 2005.

Los niveles medios de este GEI son siempre mayores sobre la cuenca Austral como se mencionó anteriormente. Allí las concentraciones de CH₄ alcanzan valores superiores durante 2003 (3.56×10^{19} moléculas/cm²) y 2004 (3.58×10^{19} moléculas/cm²), respecto de los otros sitios.

Figura 32

Variación de los niveles medios de CH₄ entre 2003-2005

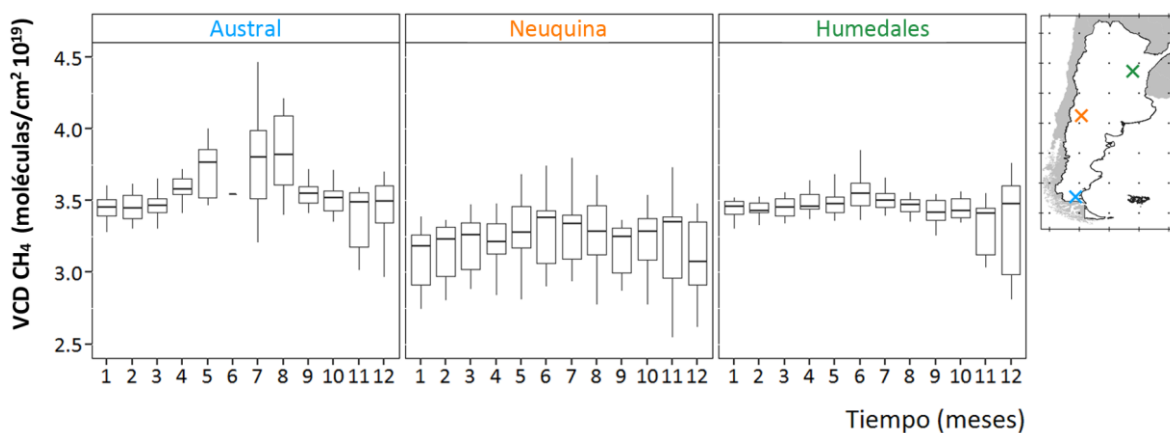


Nota. VCD de CH₄ media anual entre 2003 y 2005, en los tres sitios de muestreo. El ancho de cada boxplot es proporcional a la cantidad de datos. A la derecha, localización de los sitios evaluados en el área de estudio.

En los sitios de humedales, los niveles medios de CH₄ se mantienen en un rango relativamente estable durante los meses del período evaluado (**Fig. 33**). Se observa un aumento de la dispersión de las concentraciones de CH₄ durante noviembre y diciembre. Esto puede deberse al incremento de la temperatura en verano que i) facilita la dispersión de los contaminantes en la atmósfera (Seinfeld y Pandis, 2006); y ii) promueve la actividad microbiana, fuente de CH₄ biogénico. Cabe resaltar un fenómeno antagónico, vinculado con la degradación atmosférica del CH₄ favorecida por la radiación solar y la generación de radicales OH•.

Figura 33

Variación de los niveles medios mensuales de CH₄



Nota. VCD de CH₄ media mensual entre 2003 y 2005, en los tres sitios de muestreo. El ancho de cada boxplot es proporcional a la cantidad de datos. A la derecha, localización de los sitios evaluados en el área de estudio.

Los niveles medios mensuales de CH₄ en la cuenca Neuquina, para el período 2003-2005, son inferiores a los detectados en los humedales (**Fig. 33**). Esta diferencia puede deberse al efecto del gradiente latitudinal de CH₄ ya que estos humedales se encuentran a unos 7° de latitud por encima de la cuenca. Dado que el gradiente representa un incremento de aproximadamente un 1% en los niveles de CH₄ por grado de latitud de sur a norte, la diferencia de los valores de VCD entre estas regiones cae dentro de lo esperado.

Por su parte, en la cuenca Austral los niveles medios de CH₄ son más altos de lo esperado. A pesar de encontrarse a latitudes menores y verse favorecida por el gradiente natural, los niveles medios son superiores a los de la cuenca Neuquina e incluso a los niveles de los humedales en los meses fríos (**Fig. 33**). Las máximas concentraciones medias de CH₄ en esta zona se presentaron en los meses de junio (4.5×10^{19} moléculas/cm²) y agosto (4.2×10^{19} moléculas/cm²) de 2003. Sin embargo, durante el mes de junio, la pérdida de datos en el sur de la Patagonia es grande, probablemente debido a condiciones meteorológicas que dificultan la medición (SCIAMACHY Quality Working Group, 2018). Los datos de CH₄ disponibles de ese mes corresponden únicamente a dos observaciones durante el año 2003.

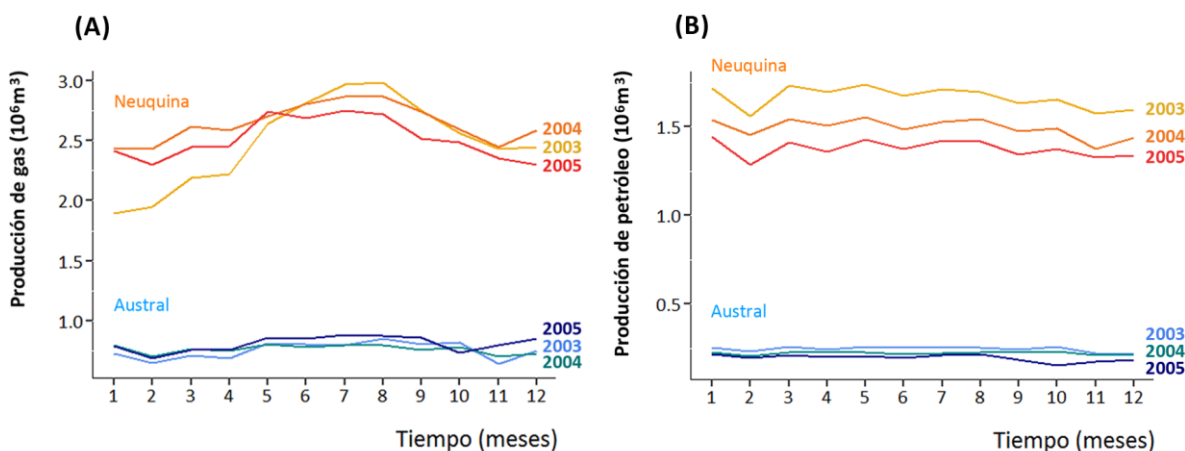
El comportamiento del CH₄ en la cuenca Austral presenta niveles máximos bien definidos durante la temporada fría, no siendo tan marcados en los otros dos sitios (**Fig. 33**). Sin embargo, la interpretación de estos resultados debe hacerse bajo la consideración de la gran falta de datos que se presenta para esta área.

En ambas cuencas, se observa una tendencia decreciente en la producción de crudo durante los años evaluados. Esta disminución es más pronunciada en la cuenca Neuquina. Si bien la producción, tanto de gas como de petróleo, es mucho mayor en la cuenca Neuquina (**Fig. 34**), el clima del sur de la Patagonia podría favorecer la concentración de los contaminantes atmosféricos debido a las bajas temperaturas (Seinfeld y Pandis, 2006), explicando las diferencias de comportamiento entre las cuencas.

La producción de gas en ambas cuencas sedimentarias muestra un patrón similar durante 2003-2005, con valores máximos de producción entre los meses de mayo y agosto-septiembre (**Fig. 34. A**). En la cuenca Austral, la producción de gas alcanza en julio valores 28% superiores respecto a febrero. En la cuenca Neuquina este aumento es mayor, alcanzando en agosto valores de producción 57% superiores respecto de enero. La producción de petróleo (**Fig. 34. B**), en cambio, no presenta la misma variación mensual que la producción de gas.

Figura 34

Producción de gas y petróleo durante los años evaluados con SCIAMACHY



Nota. Fuente de los datos: (Instituto Argentino del Petróleo y el Gas).

5.2. TANSO-FTS/GOSAT

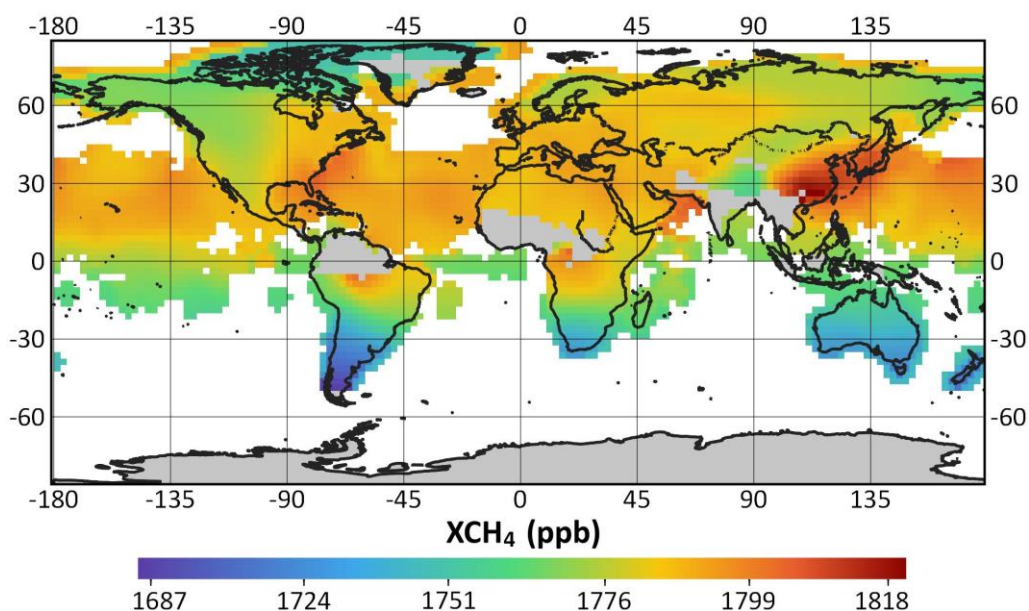
En segundo lugar, fueron procesadas las imágenes del sensor TANSO-FTS a bordo del satélite GOSAT para el período 2009-2020. Tras el pre-procesamiento, se obtuvieron 129 imágenes diarias recortadas al área de estudio, correspondiendo al 100% del total de datos

procesados. La pérdida de datos fue nula para este sensor dado que los archivos ya tenían los filtros de calidad aplicados por el NIES.

La **Figura 35** muestra un mapa global con el producto de Nivel 3 de GOSAT para el mes de junio de 2009, como un ejemplo de la cobertura de los datos. Las zonas con falta de datos, como se observa sobre el Amazonas e India, son áreas donde no se generaron los datos de Nivel 2 debido a la presencia de nubes o aerosoles. Se visualiza un área con valores máximos de CH₄ al sudeste de China, coincidiendo con las mayores regiones de humedales y plantaciones de arroz en este país (Liu et al., 2016).

Figura 35

Distribución global de CH₄ para el mes junio de 2009

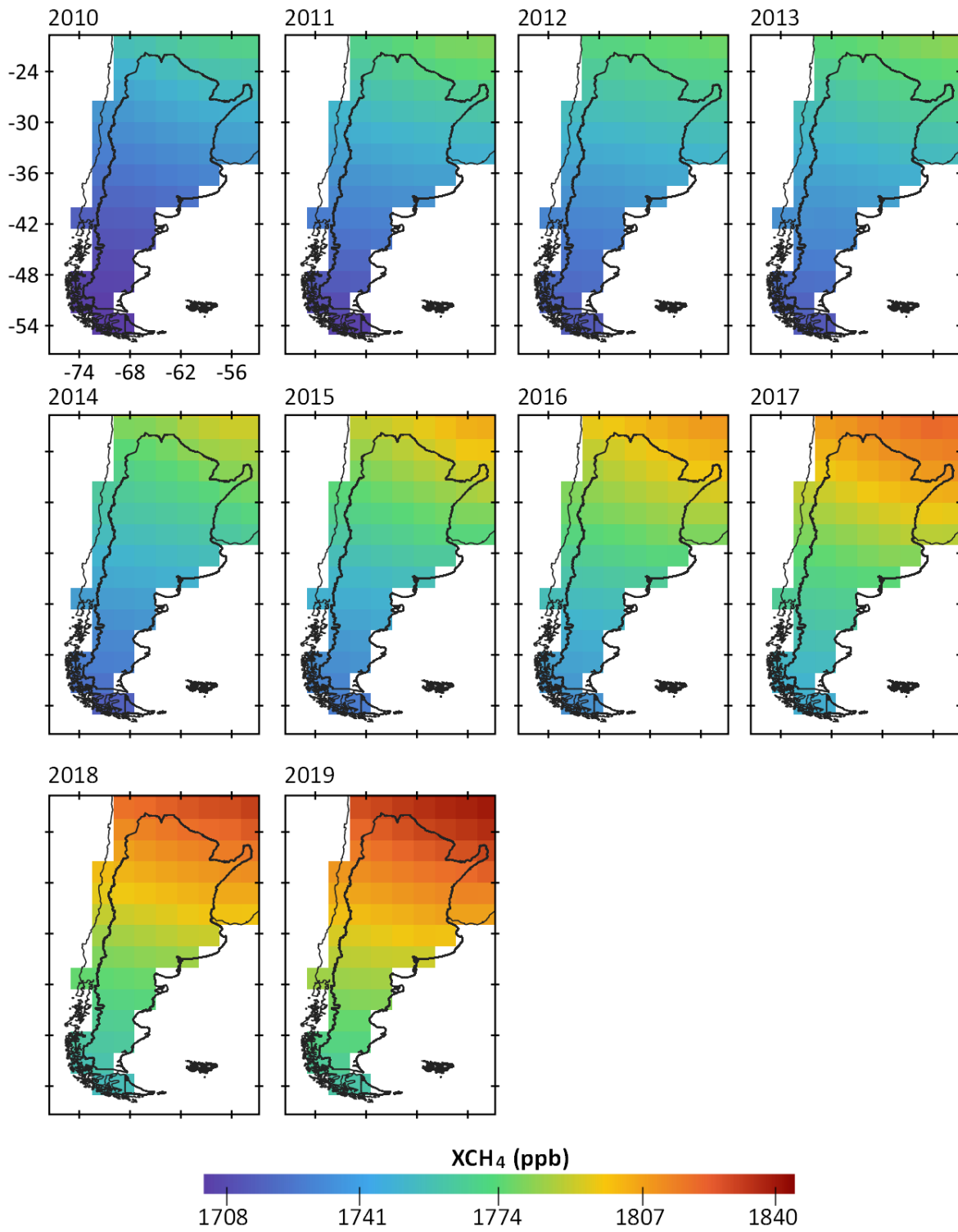


5.2.1. Análisis de los niveles medios anuales de CH₄ en Argentina

Mediante las mediciones de GOSAT se puede visualizar claramente el efecto del gradiente latitudinal en la distribución de los niveles de CH₄. Los valores máximos se encuentran al norte del área de estudio (**Fig. 36**). Con este sensor no se aprecia el aumento sobre el extremo noroeste del AOI que se detectaba con SCIAMACHY.

Figura 36

Concentración media anual de CH₄



La concentración media anual presenta un marcado incremento año a año, que indica que los niveles atmosféricos de este GEI aumentaron entre 2010-2019. La **Tabla 1** resume las concentraciones medias para todo el territorio argentino en cada uno de los años evaluados.

Tabla 1
Concentraciones medias anuales de CH₄ en Argentina

Año	Media (ppb)	Min - Max (ppb)	Desviación estándar (ppb)
2010	1734	1709-1759	14
2011	1746	1714-1771	15
2012	1748	1721-1769	14
2013	1751	1722-1772	14
2014	1758	1727-1782	15
2015	1766	1734-1792	16
2016	1773	1742-1797	16
2017	1783	1752-1809	16
2018	1791	1761-1817	16
2019	1800	1767-1826	17

Nota. La tabla resume las concentraciones medias anuales para todo el país, los valores mínimos y máximos alcanzados por año y la desviación estándar dentro del territorio.

La mayor variabilidad en las concentraciones se observa en general al sur del AOI, sobre la región patagónica (**Fig. 37**). Al mismo tiempo, la pérdida de datos es mayor en el extremo austral (**Fig. 38**), tal como sucedía con SCIAMACHY, siendo máxima durante los años 2010 y 2015. En esos años, las mediciones anuales de la región corresponden únicamente a 7-8 de los meses del año.

Figura 37

Desviación Media Absoluta (MAD) de los niveles anuales de CH₄

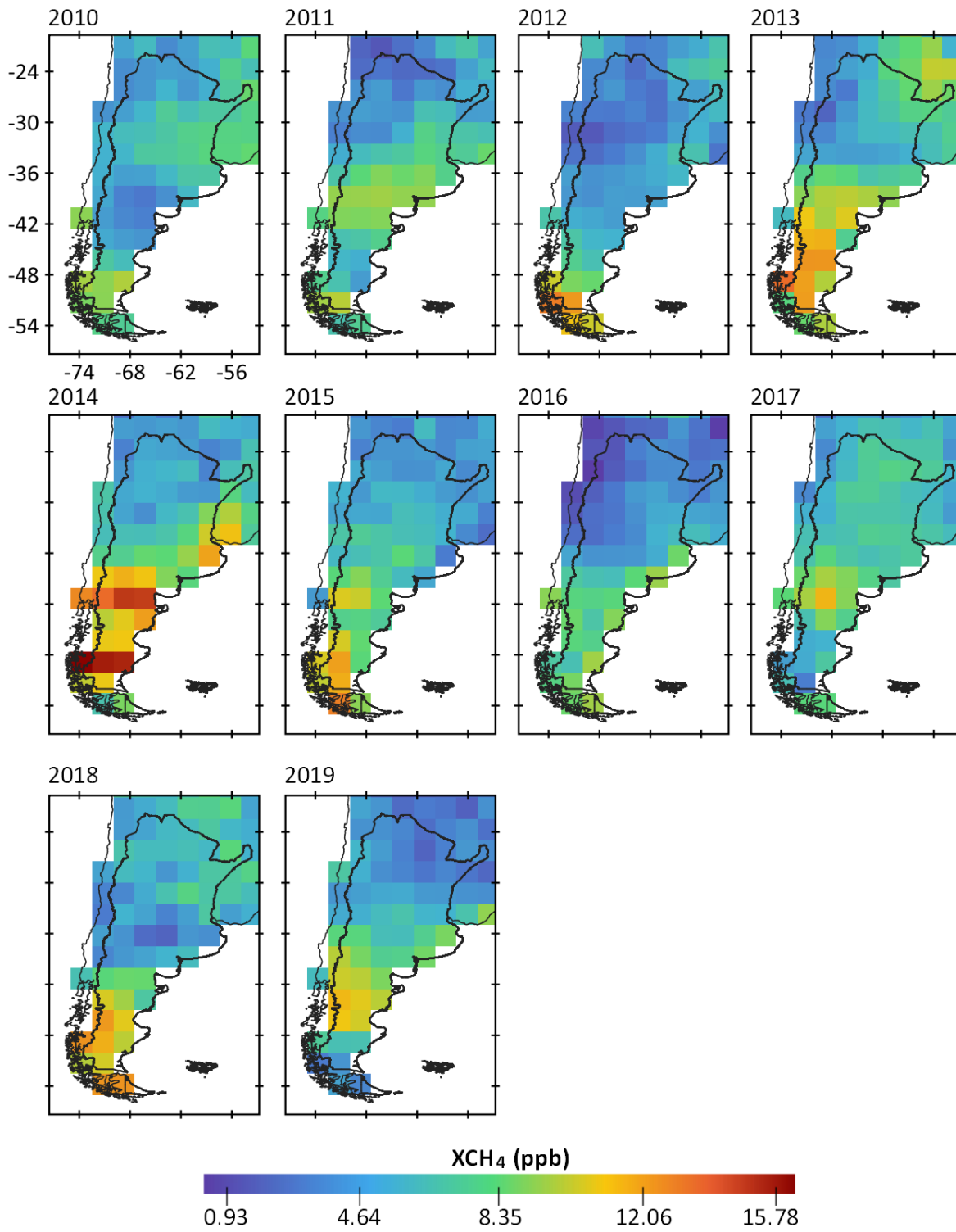
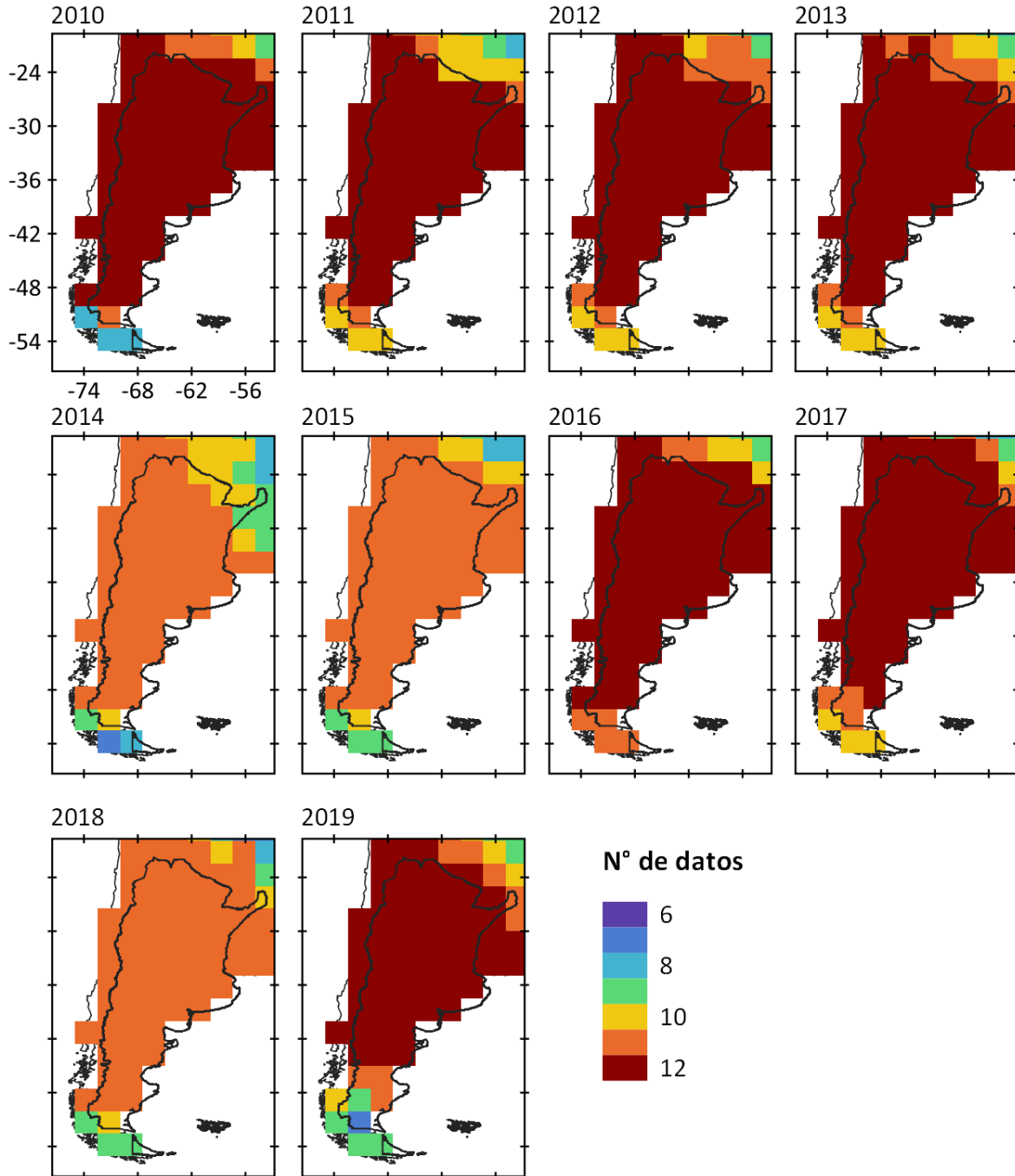


Figura 38

Número de datos anuales



5.2.2. Análisis de los niveles medios mensuales de CH₄ en Argentina

La **Figura 39** muestra las concentraciones medias de CH₄ a lo largo de los meses entre 2010-2019. La distribución espacial de este GEI, con máximos al norte y mínimos al sur, se mantiene en todos los meses. A su vez, se observa una variación estacional leve, con un aumento hacia los meses fríos del año.

La variación interanual para cada uno de los meses oscila en general entre 20-30 ppb, como muestran los mapas con la MAD mensual (**Fig. 40**). La región noreste del dominio de trabajo presentó la mayor desviación (40 ppb) durante el mes de enero.

Respecto a la falta de datos, enero y diciembre mostraron la menor cantidad de observaciones (**Fig. 41**). El mes de enero contó con áreas que presentaron datos para 9 de los 10 años evaluados, y diciembre 7 de los 10.

Figura 39

Concentración media mensual de CH₄ entre 2010 y 2019

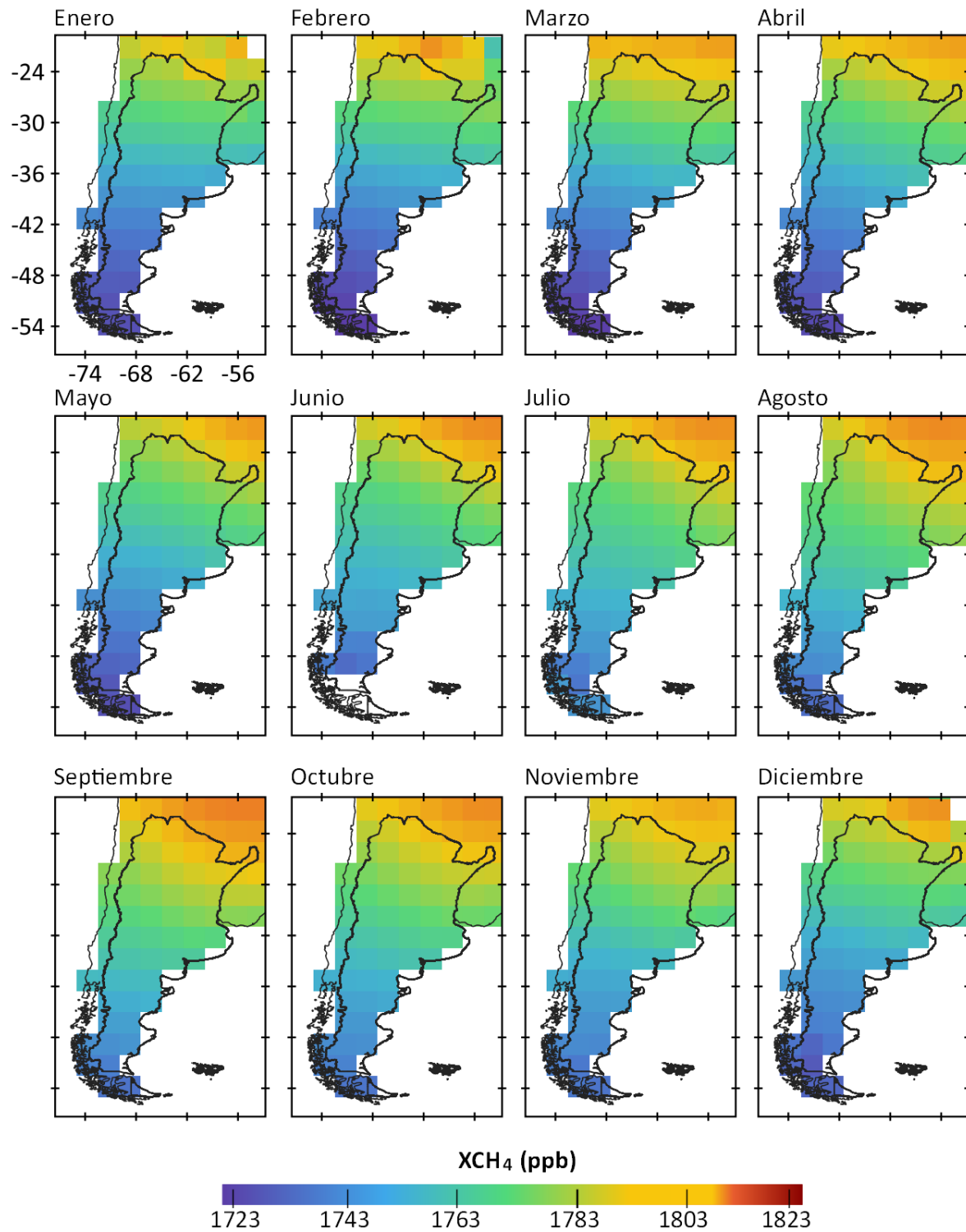


Figura 40

Desviación Media Absoluta (MAD) de los niveles mensuales de CH₄ entre 2010 y 2019

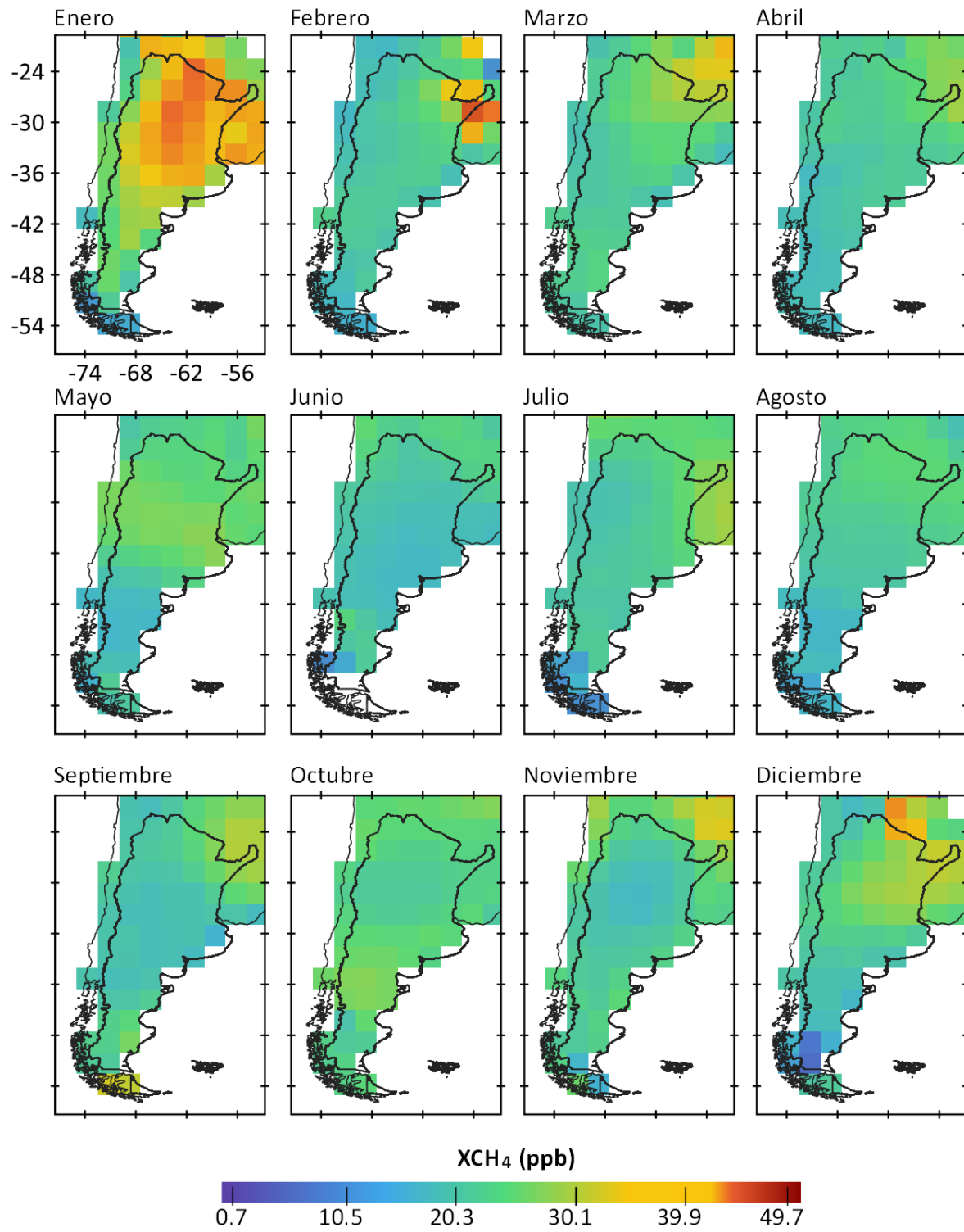
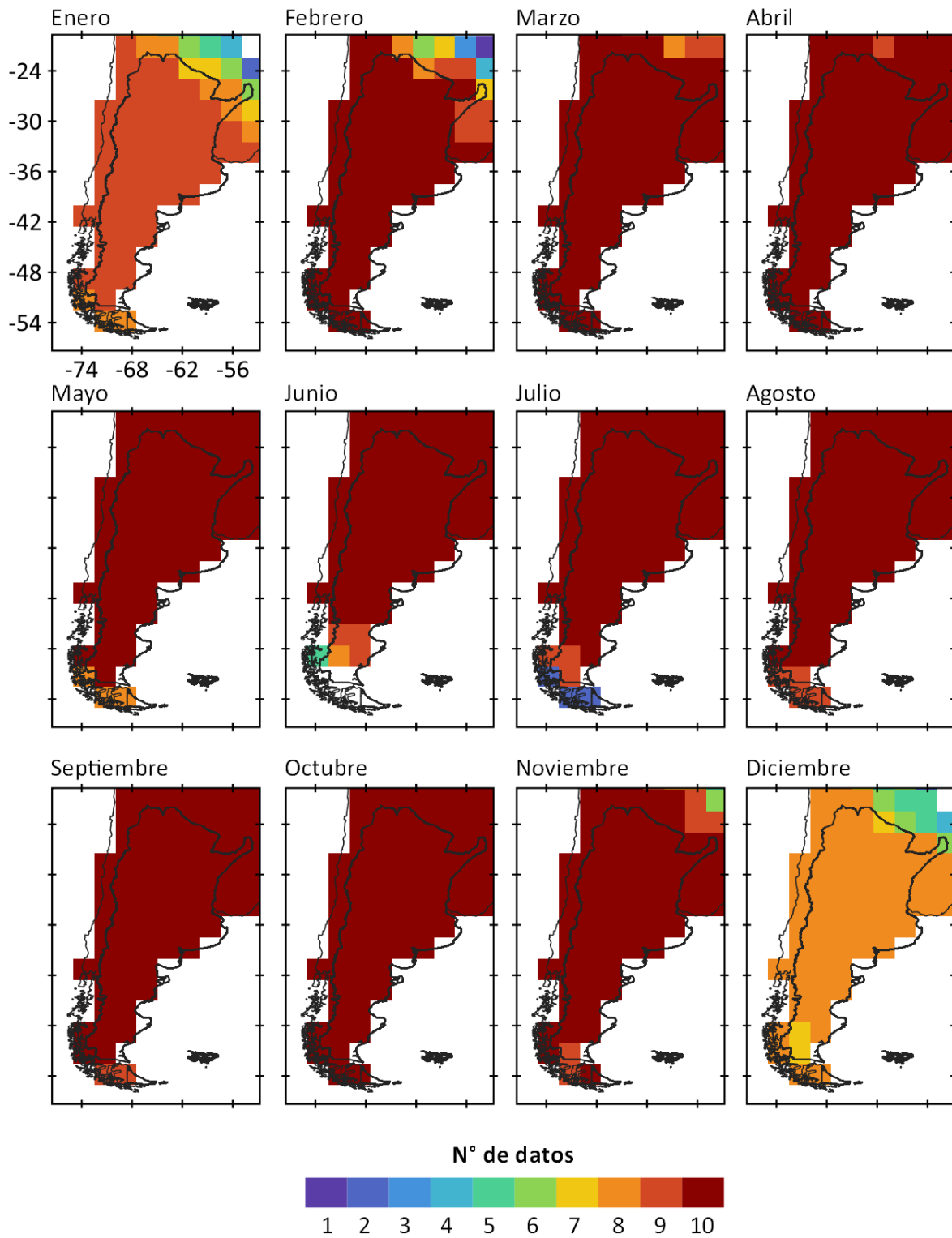


Figura 41

Cantidad de observaciones mensuales de CH₄ entre 2010 y 2019

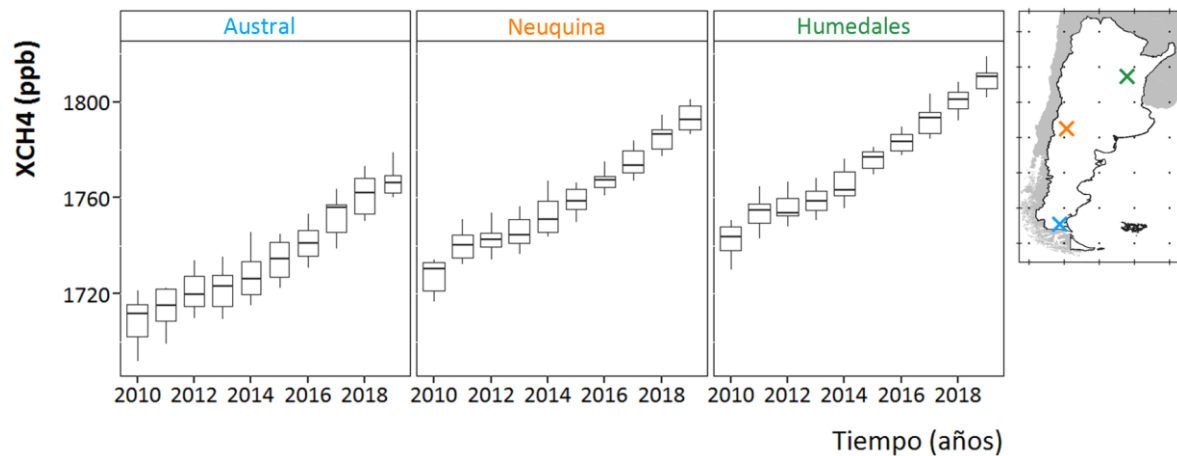


5.2.3. Comparación entre áreas de producción y humedales - GOSAT

Entre los tres sitios muestreados, la cuenca Austral fue la que presentó la mayor falta de datos. De las 120 observaciones anuales por sitio (1 observación mensual, durante 10 años), la región austral presentó 106 observaciones, con una pérdida de datos del 11.7%. La **Figura 42** muestra el aumento en las concentraciones atmosféricas de este GEI al aumentar la latitud del sitio. Al mismo tiempo, los niveles de CH₄ aumentan entre años consecutivos, las tres zonas presentan un comportamiento similar. Los niveles más bajos (1692 ppb) se presentaron en la cuenca Austral durante 2010. Las máximas concentraciones de CH₄ se presentaron en la región de humedales durante 2019, y fueron de 1819 ppb.

Figura 42

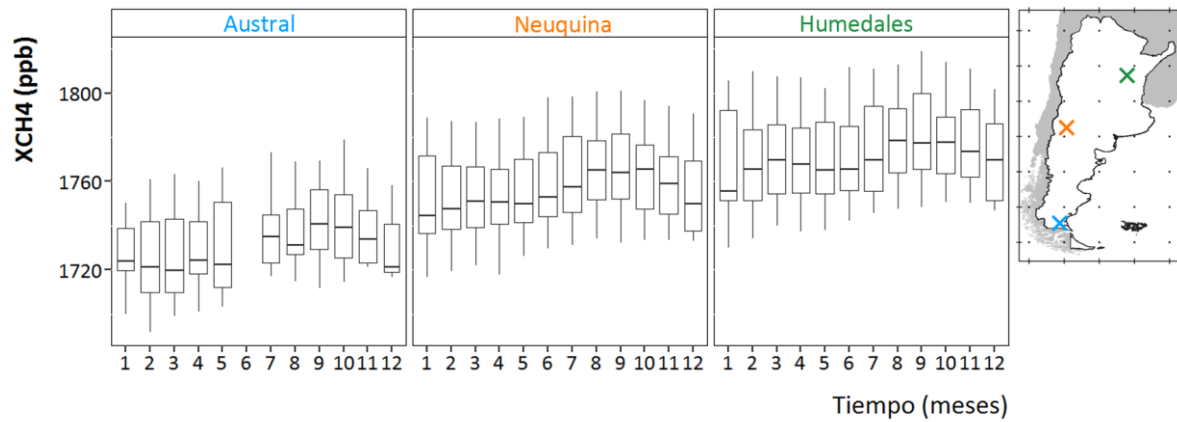
Variación de los niveles medios de CH₄ entre 2010-2019



Al evaluar la variación de las concentraciones de CH₄ entre los meses promediados durante 2010-2019 (**Fig. 43**), no se observa una estacionalidad definida. En este caso, la tendencia creciente de este GEI en el período evaluado enmascara la variación estacional. Durante todos los meses, la cuenca Austral presentó los valores más bajos. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, esta zona presenta una gran pérdida de datos durante los meses invernales de todos los años evaluados, siendo total la falta de datos para el mes de junio.

Figura 43

Variación de los niveles medios mensuales de CH₄ entre 2010-2019



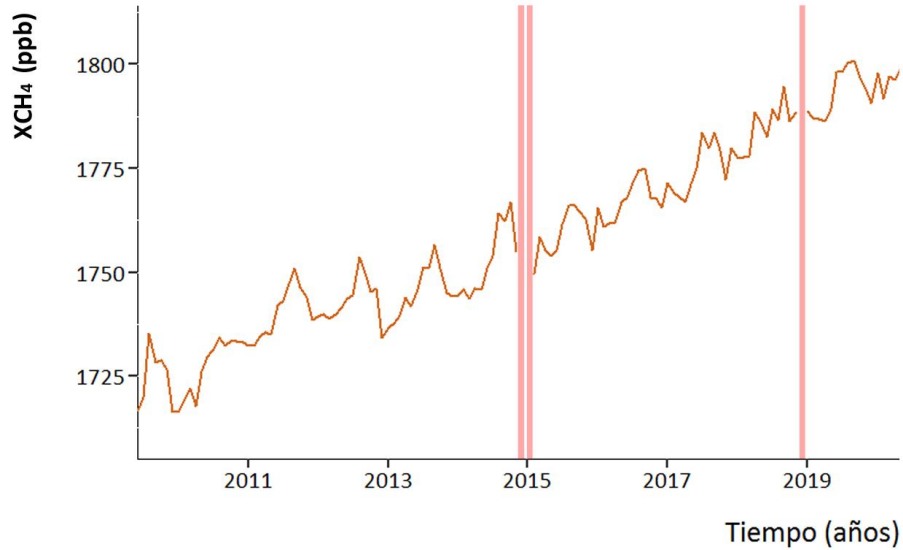
5.2.4. Análisis de la serie de tiempo y la tendencia del CH₄

Las mediciones de GOSAT muestran una tendencia creciente en los niveles de CH₄ sobre la cuenca Neuquina a lo largo del período de estudio (**Fig. 44**). Esto coincide con lo observado a escala global, donde las concentraciones atmosféricas de este GEI continúan incrementándose desde 2007, luego de una corta estabilización entre 1999 y 2006 (Turner et al., 2019).

El porcentaje de valores faltantes es de 2.27%, resultando la serie temporal incompleta. No existen datos de Nivel 3 de GOSAT para los meses de diciembre de 2014, enero de 2015 y diciembre de 2018 (**Fig. 44**). Esta falta de datos fue mencionada al presentar los mapas mensuales (**Fig. 41**). No se tiene registro de lo ocurrido con el sensor en esas fechas y el motivo de la faltante de esas mediciones.

Figura 44

Variación de los niveles medios de CH₄ sobre la cuenca Neuquina

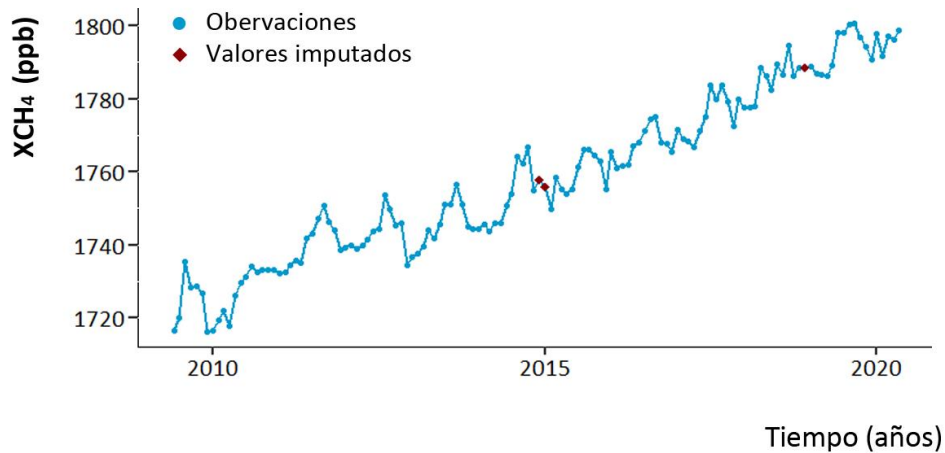


Nota. Mediciones de GOSAT (naranja). Las líneas rojas verticales indican los valores faltantes correspondientes a los meses de diciembre de 2014, enero de 2015 y diciembre de 2018.

Para completar la serie de tiempo y poder hacer un análisis temporal, los valores faltantes se imputaron empleando una media móvil ponderada lineal, como se menciona en la metodología. La **Figura 45** presenta la incorporación de los valores faltantes en la serie de tiempo.

Figura 45

Mediciones de GOSAT y valores imputados



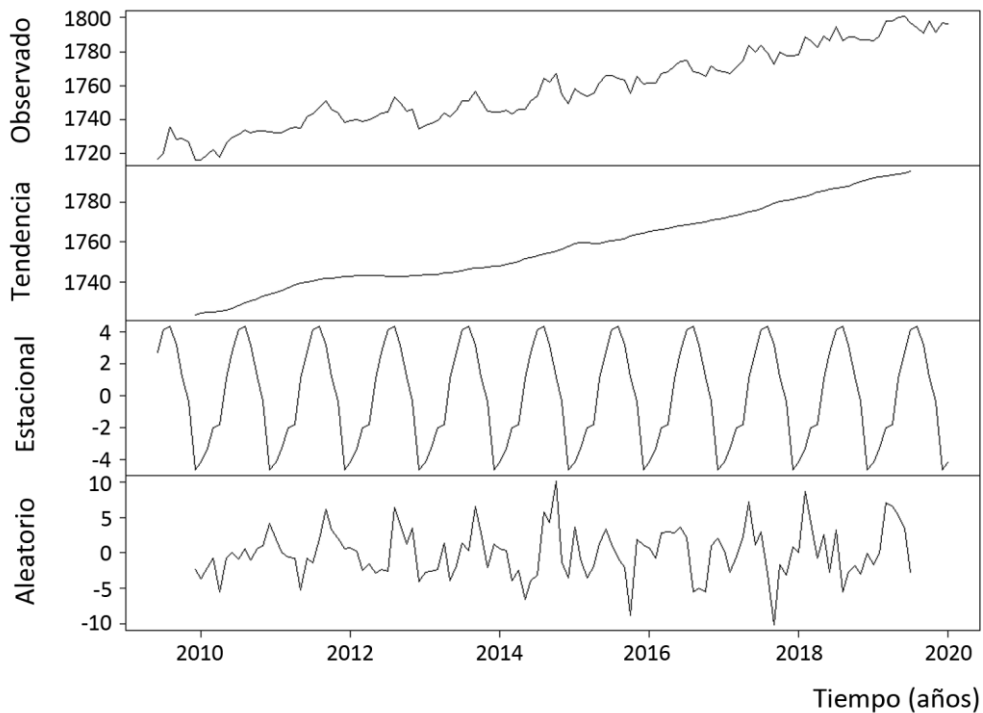
Nota. Valores faltantes reemplazados (en bordó) y valores observados (en azul).

La tendencia anual, evaluada con el estimador no paramétrico Theil-Sen, entre 2010 y 2019 es de 6.95 (6.65-7.25) ppb/año. Este valor concuerda con lo observado a escala global durante la última década, con el CH₄ incrementándose entre 5-10 ppb por año (World Meteorological Organization, 2020).

La **Figura 46** muestra la descomposición aditiva de la serie temporal. Se observa un componente estacional, con máximas concentraciones de CH₄ en meses fríos y mínimos en verano (± 4). Esta variación puede atribuirse a: i) el aumento de la producción y consumo de gas, y la quema de biomasa, para calefacción en la zona; ii) el incremento en los niveles de OH \cdot debido a la mayor incidencia de radiación solar en verano; iii) una menor dispersión atmosférica debido a las bajas temperaturas.

Figura 46

Descomposición aditiva de la serie temporal de CH₄



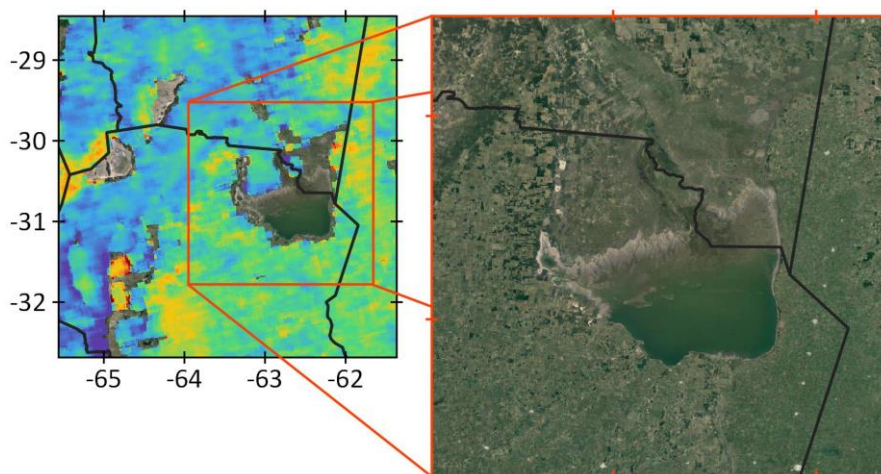
5.3. TROPOMI/SENTINEL-5P

Por último, se procesaron las imágenes del sensor TROPOMI a bordo del satélite Sentinel-5P para el año 2019. Tras el pre-procesamiento para generar productos de Nivel 3, se obtuvieron 816 imágenes diarias recortadas al área de estudio, correspondientes al 62% del total de datos descargados.

El modelo RemoTec, empleado para los datos de este sensor, no recupera la concentración en zonas con alta variabilidad en el relieve del terreno. Esto otorga una dificultad extra para el monitoreo de CH₄ en zonas montañosas, como en instalaciones petroleras sobre la cordillera andina. Al mismo tiempo, la mayoría de los cuerpos de agua continentales no presentan datos, como puede verse sobre la laguna Mar Chiquita (**Fig. 47**), dado que durante el procesamiento realizado por el equipo técnico del S5P se descartan las mediciones con bajo albedo superficial.

Figura 47

Detalle de la laguna Mar Chiquita en la provincia de Córdoba

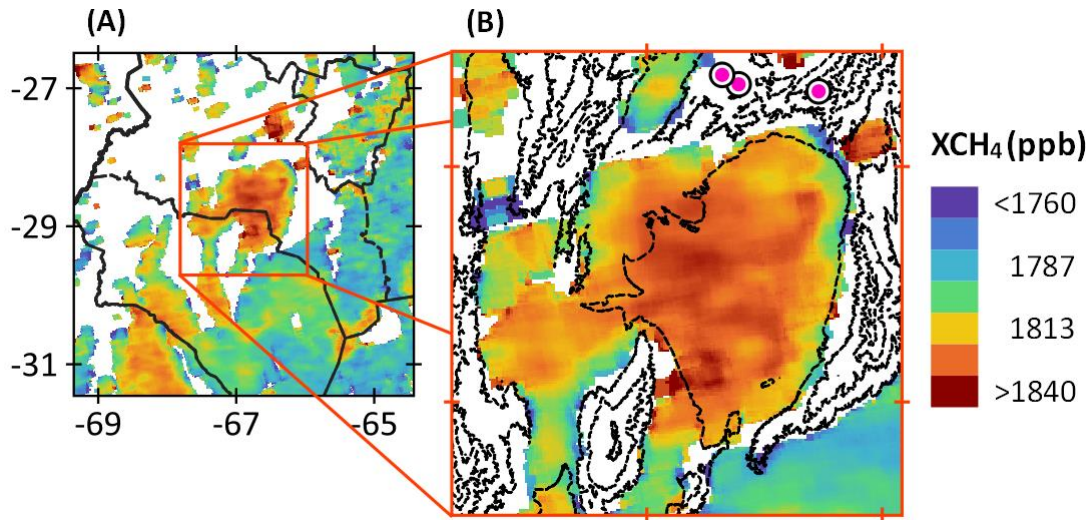


La alta resolución espacial de TROPOMI permite visualizar en mayor detalle la distribución del CH₄ en el país. Se distinguen niveles máximos (>1840 ppb) en pequeñas regiones desérticas en las provincias de San Juan, La Rioja y Catamarca (**Fig. 48**). La presencia de arqueas metanogénicas halófitas, como las encontradas en el desierto de Atacama en Chile (Gómez-Silva et al., 2019), podría explicar los niveles de CH₄ sobre estas regiones. En Argentina, estos sitios se encuentran además rodeados de explotaciones mineras a cielo abierto (**Fig. 48. B**). Si bien, dentro de esta actividad, las minas de carbón son la principal fuente de este GEI, se han encontrado altas tasas de emisión de CH₄ en minas de oro de Sudáfrica (Mkhabela y Manzi, 2017). El CH₄ es emitido por fuentes

subterráneas interceptadas durante las operaciones de excavación y perforación, siendo liberado a la atmósfera general de la mina (du Plessis y van Greuning, 2011).

Figura 48

Observaciones de CH₄ sobre el salar de Pipanaco

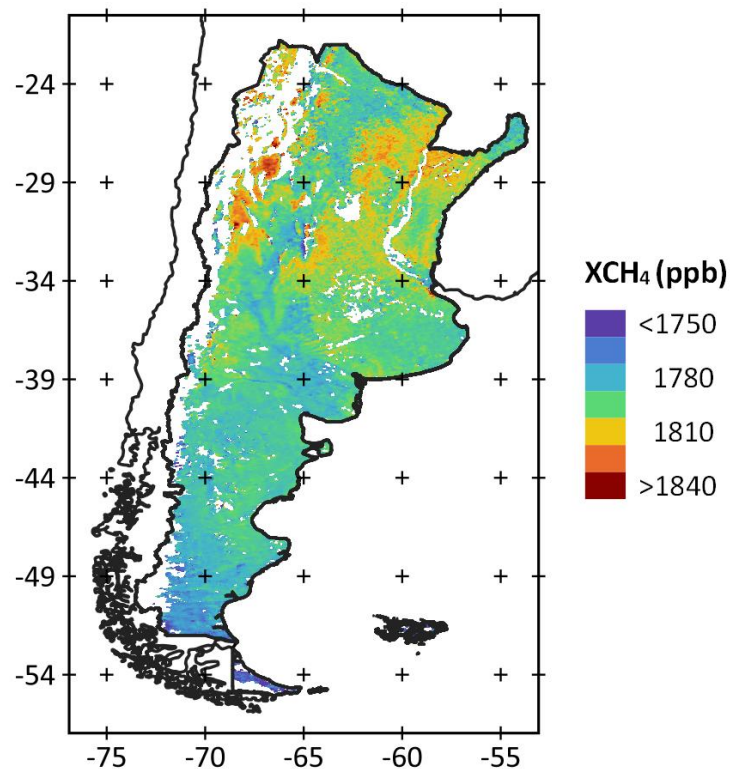


Nota. (A) Concentración media anual de CH₄ durante 2019. (B) Detalle del salar, las líneas negras indican saltos de 1000 m en la elevación de la superficie (a partir de modelo digital de elevación de 90 m, SRTM). Arriba a la derecha (círculos magenta), se localizan tres explotaciones mineras de Au, Cu y Mo. Fuente de los datos: (Secretaría de Gobierno de Energía).

La **Figura 49** muestra los niveles medios de CH₄ sobre el territorio nacional para el año 2019. La concentración media en el total de Argentina fue de 1792±12 ppb. Este valor es menor al obtenido con los datos de GOSAT (1800±17 ppb) para el mismo año. Al mismo tiempo, se observan valores faltantes a lo largo de toda la cordillera de los Andes. Esto surge del Modelo RemoTec, que no recupera la concentración de CH₄ en áreas con alta variabilidad de altitud, por lo tanto, es una característica del producto satelital.

Figura 49

Concentración media de CH₄ durante 2019

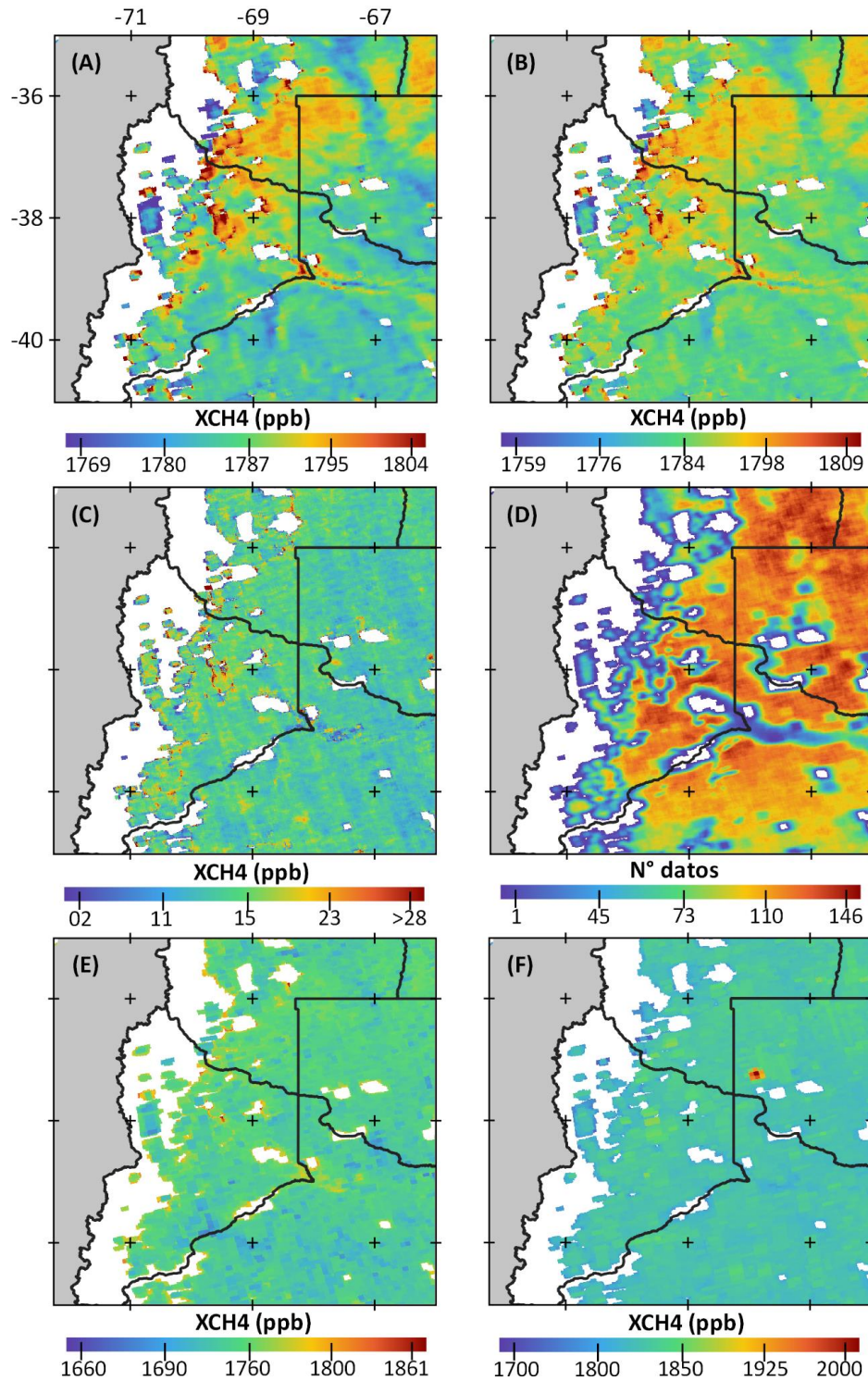


El efecto del gradiente latitudinal no es tan evidente en las observaciones de este sensor. Aun así, los niveles son siempre menores al sur de la Patagonia y ascienden hacia el norte. En el centro y noreste del país se observan grandes áreas donde las concentraciones de CH₄ superan los 1810 ppb (**Fig. 49**), estando por encima de la media del país. En estas zonas se encuentran diversas fuentes de este GEI, como humedales, cultivos de arroz y grandes extensiones de territorio ocupadas con ganadería.

Dentro de la cuenca Neuquina, la distribución espacial del CH₄ no es homogénea y las concentraciones máximas coinciden en líneas generales con zonas de explotación de gas y petróleo, principalmente al centro y norte de la provincia de Neuquén y al sur de Mendoza (**Fig. 50**). La concentración media de CH₄ sobre la cuenca durante 2019 fue de 1787±8 ppb

Figura 50

Estadísticos anuales de CH₄ durante 2019



Nota. (A) Media. (B) Mediana. (C) MAD. (D) N. (E) Mínimos. (F) Máximos.

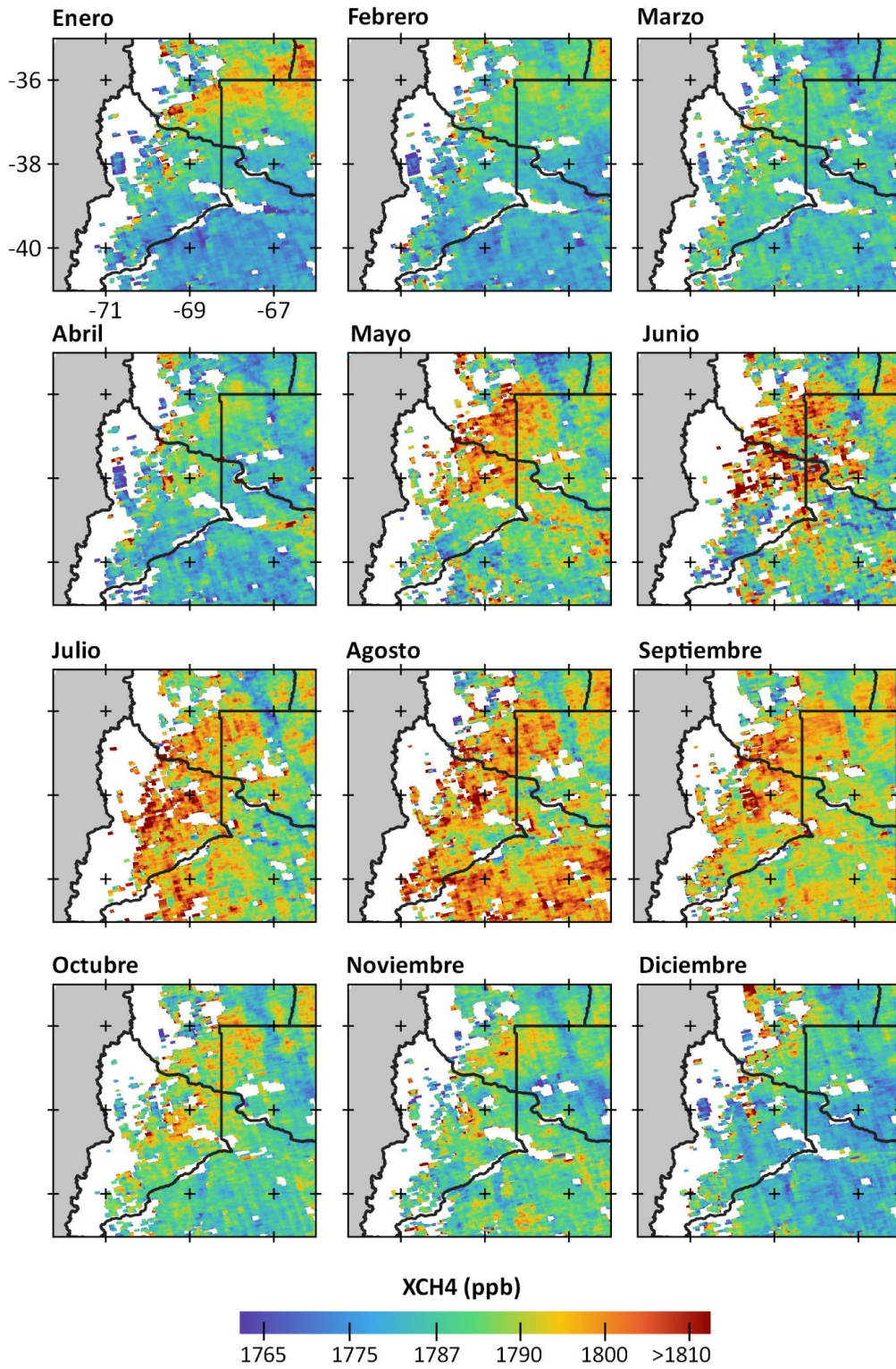
Se observan niveles altos de CH₄ sobre la ciudad de Neuquén (38°57'S, 68°02'O) (**Fig. 50. A**), la zona contiene un gran número de pozos de extracción de hidrocarburos. Lo mismo ocurre alrededor de los cuerpos de agua de la provincia. Sin embargo, las mediciones cerca de los cuerpos de agua no son representativas de las concentraciones anuales porque corresponden a un único día de observación, como puede verse en el mapa con la distribución del número de datos (**Fig. 50. D**).

El mapa con los niveles mínimos (**Fig. 50. E**) muestra que hay pequeñas zonas en el centro de la provincia de Neuquén donde los niveles nunca fueron inferiores a 1860 ppb a lo largo de 2019, siendo este valor superior a la concentración media de toda la cuenca (1787±8 ppb). Por otro lado, el mapa con los niveles máximos anuales (**Fig. 50. F**) permite identificar que hubo concentraciones superiores a los 2000 ppb en algún momento de 2019, en la región de la cuenca que pertenece a la provincia de La Pampa. Este evento se detalla en la sección **5.3.1**.

Al evaluar los niveles medios mensuales para el 2019 vemos que los niveles medios más altos de CH₄ se presentaron en el centro y noreste de Neuquén y el sur de Mendoza, entre los meses de mayo y septiembre inclusive (**Fig. 51**). En agosto, en particular, se observan concentraciones altas en la sección noroeste de la provincia de Río Negro.

Figura 51

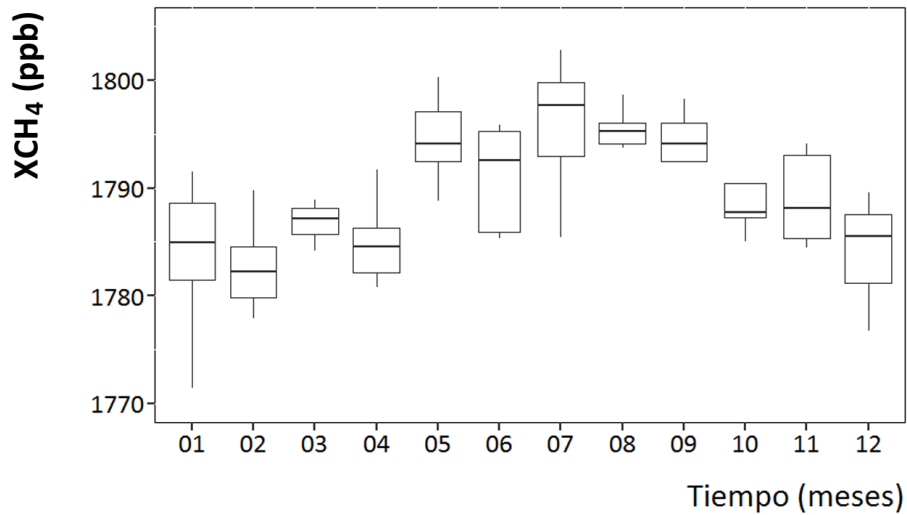
Concentraciones medias mensuales de CH₄ durante 2019



Los mayores niveles de CH₄ en temporada fría coinciden con lo observado previamente con los otros sensores. El mes de julio presentó los máximos niveles medios de todo el año, con concentraciones superiores a los 1800 ppb (**Fig. 52**).

Figura 52

Variación de los niveles medios mensuales de CH₄ en la cuenca Neuquina durante 2019



Al evaluar la variabilidad de las concentraciones atmosféricas en cada mes (**Fig. 53**), se observa que por lo general es baja (<20 ppb) y se distribuye de manera relativamente uniforme en toda la cuenca. Gran parte de los altos niveles observados entre mayo y agosto corresponden a pocas observaciones, siendo el mes de junio el que reúne la menor cantidad de datos (**Fig. 54**).

Figura 53

Desviación Media Absoluta (MAD) de los niveles mensuales de CH₄ durante 2019

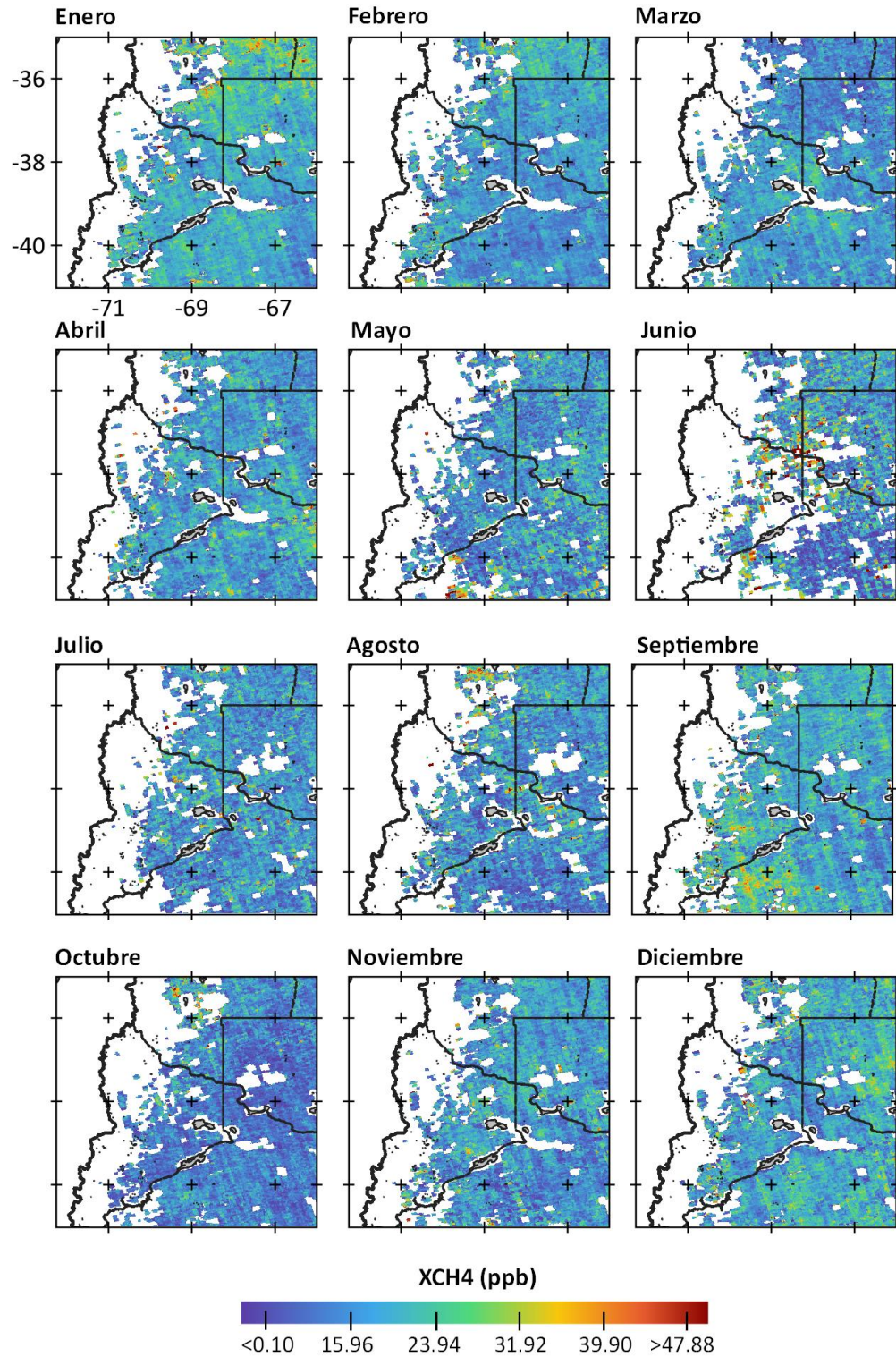
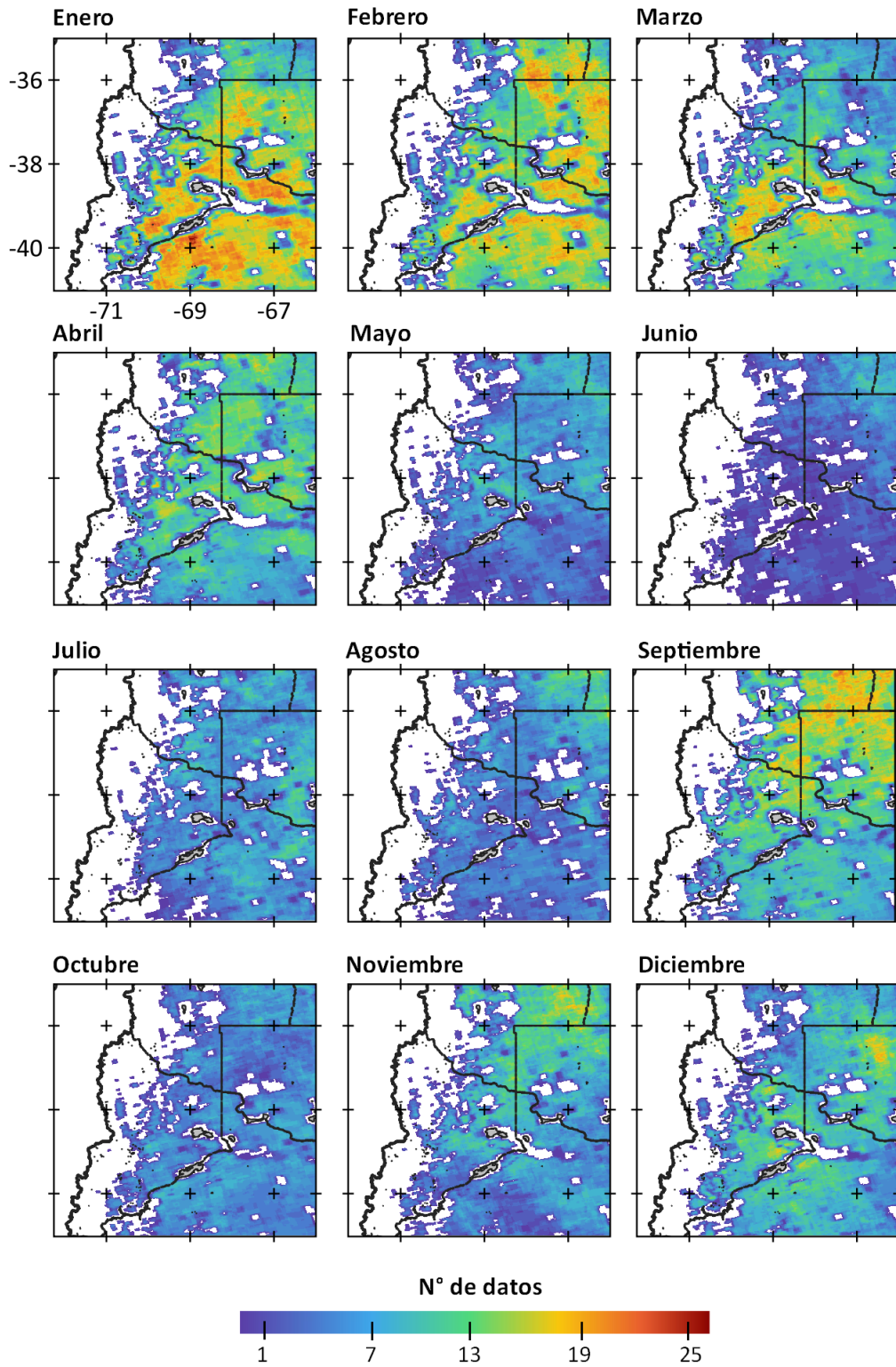


Figura 54

Cantidad de observaciones mensuales de CH₄ durante 2019



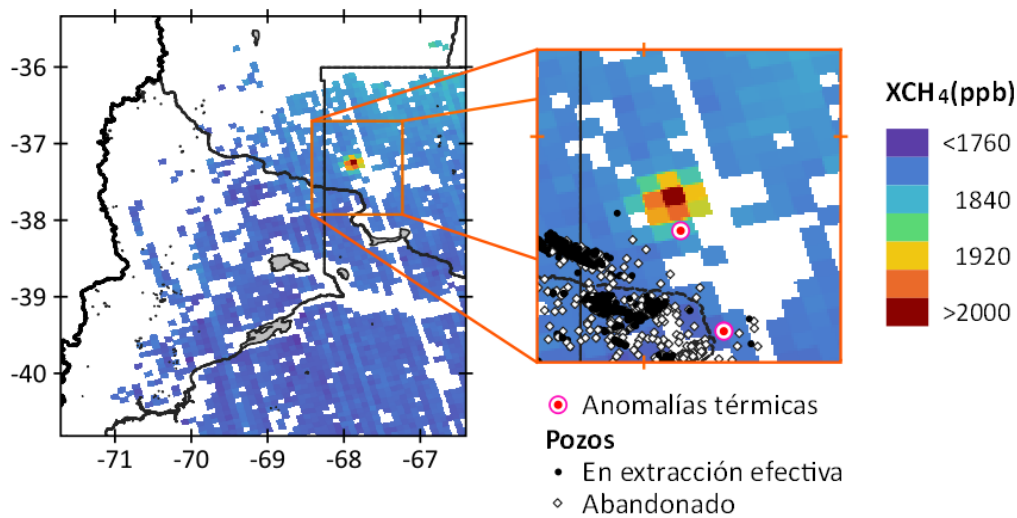
5.3.1. Observación de un foco emisor de CH₄ durante enero de 2019

Durante 2019 hubo valores extremos de concentración por encima de 2000 ppb (máximo 2063 ppb) en una zona puntual dentro de la cuenca Neuquina (**Fig. 50. F**). A unos 35 km al suroeste del máximo localizado, se encuentra un agrupamiento de pozos activos, mayoritariamente petrolíferos. Alrededor, se distribuyen una gran cantidad de pozos abandonados, mayormente de exploración, sin sistema de extracción.

Estos altos niveles se detectaron el 25 de enero, a 10 km de sitios de venteo no declarados, en el límite de la provincia de La Pampa con Neuquén y Mendoza (**Fig. 55**). Estos venteos se conocen como anomalías térmicas y fueron detectados por la (Secretaría de Gobierno de Energía, 2009) empleando los sensores VIIRS y MODIS, durante el mes de enero de 2019.

Figura 55

Mediciones de CH₄ del 25 de enero de 2019



Nota. Se muestra la localización de los venteos detectados (anomalías térmicas) en enero de 2019 por la Secretaría de Energía. Al suroeste se ubican pozos de petróleo y gas, activos (círculos negros) y abandonados (círculos blancos con borde negro).

Esta medición de la concentración de CH₄ por encima de los 2000 ppb corresponde a un único día. Por tanto, la influencia de este evento en los niveles medios mensuales es baja. Dada la fugacidad del evento, y los altos niveles de CH₄ alcanzados, es probable que el máximo observado se deba a un venteo directo de gas a la atmósfera.

6. Conclusiones

En esta sección se enumeran las principales conclusiones provenientes de los resultados de este Trabajo Final. Asimismo, se mencionan posibles líneas de investigación a futuro.

Este trabajo se ubica entre los primeros estudios que evalúan la aplicación de información satelital para el monitoreo de CH₄ en instalaciones de gas y petróleo de nuestro país. Para su desarrollo se incorporaron conocimientos de teledetección, Sistemas de Información Geográfica y programación. Se procesaron los datos obtenidos por los satélites ENVISAT, GOSAT y Sentinel-5P. Su análisis y tratamiento comprendió la lectura de bibliografía específica (artículos científicos y manuales técnicos), el uso de diferentes lenguajes de programación (R, Python) y programas geográficos (QGIS 3.16, VISAN).

Se trabajó con mediciones satelitales de tres sensores diferentes (SCIAMACHY, TANSO-FTS, TROPOMI), abarcando un período de 13 años comprendidos entre 2003-2005 y 2010-2019. Se identificaron áreas con niveles mínimos y máximos de CH₄ dentro del territorio nacional y en la cuenca Neuquina, evaluando las posibles fuentes de este GEI en función de las características de cada zona y las referencias bibliográficas.

Se evaluó la variación mensual y anual de las concentraciones en tres períodos diferentes comprendidos por el tiempo de medición de cada satélite. Se encontró un patrón consistente entre los tres períodos, con niveles máximos en meses fríos y mínimos en verano. Esta variación estacional puede atribuirse al aumento de la producción y consumo de gas, y la quema de biomasa, para calefacción, pero también a una menor dispersión atmosférica debido a las bajas temperaturas. Al mismo tiempo, en verano interviene el incremento en los niveles de OH• (sumidero principal de CH₄), por la mayor incidencia de radiación solar.

Los datos del sensor SCIAMACHY mostraron altas concentraciones de este GEI en el sur de la Patagonia, sobre la cuenca sedimentaria denominada Austral. Esto no se observó en los períodos medidos por los otros dos sensores. Esta diferencia puede deberse a la falta de datos, que es una fuente de error en las mediciones de este sensor.

Las observaciones de GOSAT, si bien de baja resolución espacial, se encuentran ampliamente validadas por campañas terrestres. Su producto satelital de Nivel 3 permite observar claramente el efecto del gradiente latitudinal en el país, con los niveles de CH₄ incrementándose de sur a norte.

El análisis de la serie temporal, realizado con los datos de GOSAT, muestra que los niveles atmosféricos de este GEI en la cuenca Neuquina se incrementaron a una tasa de 6.95 ppb/año entre 2010 y 2019, coincidiendo con la tendencia global. En dicho período de tiempo las concentraciones de CH₄ en la cuenca aumentaron alrededor de 100 ppb.

El producto satelital diario del sensor TROPOMI, y su alta resolución espacial, posibilitan la detección a la escala de ciudades, ampliando el alcance y la aplicabilidad de las mediciones satelitales atmosféricas. Dentro de la cuenca Neuquina, se pudo observar que la distribución espacial del CH₄ no es homogénea y se concentra principalmente al centro y norte de la provincia de Neuquén, coincidiendo de manera general con instalaciones de gas y petróleo. Se encontró que los niveles medios durante 2019 (1787±8 ppb) fueron inferiores a los niveles medios de Argentina (1792±12 ppb). Sin embargo, se pudieron observar concentraciones por encima de los 2000 ppb ocurridas en un único día de enero, en una zona puntual de la cuenca cercana a sitios de venteo no declarados.

Del trabajo realizado, surgen ciertas cuestiones pueden dificultar la aplicación de los sensores remotos en el monitoreo de rutina de contaminantes atmosféricos. Por ejemplo, una mayor pérdida de datos en regiones con determinadas características puede limitar la información disponible del lugar. Esto es lo que ocurrió en áreas con relieves montañosos, como la cordillera de los Andes, y en regiones con condiciones meteorológicas que dificultan la medición, como el sur de la Patagonia. Al mismo tiempo, uno de los mayores desafíos que enfrenta la teledetección atmosférica es la capacidad de diferenciar las concentraciones medidas según los estratos de la atmósfera. La aplicación de datos satelitales para el control de fugas en las instalaciones de gas y petróleo requiere una alta resolución espacial y temporal, junto con el conocimiento sobre los niveles atmosféricos cercanos a las instalaciones.

Como líneas de trabajos futuros se proponen:

- Evaluar modelos que permitan recuperar las concentraciones troposféricas a partir de información satelital y datos locales (por ejemplo, presión superficial).
- Extender los análisis realizados a otros gases generados en las instalaciones hidrocarburíferas. Estudios realizados en Estados Unidos muestran que existe una correlación espacial entre los niveles de CH₄ y las concentraciones de otras especies co-emitidas por los pozos de extracción, como el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el monóxido de carbono (CO). El sensor TROPOMI presenta grandes posibilidades para este tipo de análisis, ya que mide simultáneamente estos gases.
- Evaluar la aplicación de la constelación de satélites privados GHGSat sobre la cuenca Neuquina. Estos instrumentos de última generación están diseñados para medir y cuantificar emisiones de GEIs de fuentes puntuales tan pequeñas como los pozos de gas y petróleo. La constelación está compuesta actualmente por tres satélites, dos de ellos (GHGSat-C1 y GHGSat-C2) están optimizados para medir CH₄ con una resolución espacial de 25 m y un período de revisita de 14 días. La Agencia Espacial Europea ofrece acceso a los datos de GHGSat para proyectos de investigación científica y el desarrollo de aplicaciones. Los datos se pueden solicitar con la presentación de un proyecto, sujeto a evaluación por parte de la ESA. El uso

combinado de múltiples observaciones sobre un mismo sitio habilita el desarrollo de un producto de monitoreo para la detección semiautomática de grandes cambios en las tasas de emisión, empleando umbrales predeterminados. La aplicación de un sistema de detección de fugas en las instalaciones de gas y petróleo permitiría su localización temprana, disminuyendo la pérdida de gas natural como recurso y como gas de efecto invernadero, en un contexto de cambio climático acelerado.

7. Bibliografía

- Antonio, J. S. (2010). Forzamiento radiativo y cambios químicos en la atmósfera. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 104(1), 149-173.
- Apituley, A., Pedernana, M., Sneep, M., Veeffkind, J. P., Loyola, D. y Hasekamp, O. (2017). *Sentinel-5 Precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual, SRON-S5P-LEV2-MA-001*. Royal Netherlands Meteorological Institute, Ministry of Infrastructure and Environment.
- Baird, C. (2001). *Química Ambiental*. Reverte.
- Barkley, M. P., Monks, P. S., Hewitt, A. J., Machida, T., Desai, A., Vinnichenko, N., Nakazawa, T., Yu Arshinov, M., Fedoseev, N., y Watai, T. (2007). Assessing the near surface sensitivity of SCIAMACHY atmospheric CO₂ retrieved using (FSI) WFM-DOAS. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(13), 3597–3619. <https://doi.org/10.5194/acp-7-3597-2007>.
- Barros, V. R., Boninsegna, J. A., Camilloni, I. A., Chidiak, M., Magrín, G. O., y Rusticucci, M. (2014). Climate change in Argentina: trends, projections, impacts and adaptation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6(2), 151–169. <https://doi.org/10.1002/wcc.316>.
- Belikov, D., Arshinov, M., Belan, B., Davydov, D., Fofonov, A., Sasakawa, M., & Machida, T. (2019). Analysis of the Diurnal, Weekly, and Seasonal Cycles and Annual Trends in Atmospheric CO₂ and CH₄ at Tower Network in Siberia from 2005 to 2016. *Atmosphere*, 10(11), 689. <https://doi.org/10.3390/atmos10110689>.
- Blake, D. (2013). Methane, nonmethane hydrocarbons, alkyl nitrates, and chlorinated carbon compounds including 3 chlorofluorocarbons (CFC-11, CFC-12 and CFC-113) in whole-air samples. Carbon dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory. U.S. Department of Energy. Oak Ridge Tenn. U.S.A. <https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/otheratg/blake/blake.html>.
- Boninsegna, J. A. (2014). Impacto del cambio climático en los oasis del oeste argentino. *Cienc Invest*, 64, 45-58.
- Brantley, H. L., Thoma, E. D., Squier, W. C., Guven, B. B., y Lyon, D. (2014). Assessment of Methane Emissions from Oil and Gas Production Pads using Mobile Measurements. *Environmental Science & Technology*, 48(24), 14508–14515. <https://doi.org/10.1021/es503070q>.
- Brizzi, G. (2016). *ENVISAT-1 Product Specifications. Volume 15: SCIAMACHY Product Specifications. Issue 3 / M*.
- Butz, A., Guerlet, S., Hasekamp, O., Schepers, D., Galli, A., Aben, I., Frankenberg, C., Hartmann, J. M., Tran, H., Kuze, A., Keppel-Aleks, G., Toon, G., Wunch, D., Wennberg, P., Deutscher, N., Griffith, D., Macatangay, R., Messerschmidt, J., Notholt, J., y Warneke, T. (2011). Toward accurate CO₂ and CH₄ observations from GOSAT. *Geophysical Research Letters*, 38(14), n/a. <https://doi.org/10.1029/2011gl047888>.
- Butz, A., Hasekamp, O. P., Frankenberg, C., Vidot, J., y Aben, I. (2010). CH₄ retrievals from space-based solar backscatter measurements: Performance evaluation against simulated aerosol and cirrus loaded scenes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D24). <https://doi.org/10.1029/2010jd014514>.

- Bylin, C., Robinson, D., Gillis, B., y Cacho, M. (2011). Reduciendo las Emisiones de Metano en la Industria del Petróleo y del Gas para Alcanzar Beneficios Económicos, Operacionales y Medioambientales. *Met&Flu* (5).
- Cardaci, M. (2015). *ENVISAT-1 Product Specifications. Annex A: Product Data Conventions*.
- Castañeda, M. E. y Barros V. R. (1994). Las tendencias de la precipitación en el Cono sur de América al Este de los Andes. *Meteorológica*, 19, 23-32.
- Chuvieco, E. (2000). *Fundamentos de teledetección espacial*. Rialp.
- Cusworth, D. H., Jacob, D. J., Sheng, J.-X., Benmergui, J., Turner, A. J., Brandman, J. y Randles, C. A. (2018). Detecting high-emitting methane sources in oil/gas fields using satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(23), 16885-16896. doi: 10.5194/acp-18-16885-2018.
- Dalsøren, S. B., Myhre, C. L., Myhre, G., Gomez-Pelaez, A. J., Søvde, O. A., Isaksen, I. S. A., Weiss, R. F., y Harth, C. M. (2016). Atmospheric methane evolution the last 40 years. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(5), 3099–3126. <https://doi.org/10.5194/acp-16-3099-2016>.
- de Gouw, J. A., Veefkind, J. P., Roosenbrand, E., Dix, B., Lin, J. C., Landgraf, J. y Levelt, P. F. (2020). Daily Satellite Observations of Methane from Oil and Gas Production Regions in the United States. *Scientific Reports*, 10(1), 1379. doi: 10.1038/s41598-020-57678-4.
- Denman, K.L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P.M. Cox, R.E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S Ramachandran, P.L. da Silva Dias, S.C. Wofsy y X. Zhang. (2007). Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. En Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Dlugokencky, E. J., Nisbet, E. G., Fisher, R., y Lowry, D. (2011). Global atmospheric methane: budget, changes and dangers. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1943), 2058-2072.
- Doyle, M. E., Saurral, R. I., y Barros, V. R. (2011). Trends in the distributions of aggregated monthly precipitation over the La Plata Basin. *International Journal of Climatology*, n/a. <https://doi.org/10.1002/joc.2429>.
- du Plessis, J. J. L. y van Greuning, D. C. (2011). Destruction of underground methane at Beatrix Gold Mine. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 111, 887-894.
- Engel-Cox, J.A., Hoff, R.M. y Haymet, A.D.J. (2004). Recommendations on the use of satellite remote-sensing data for urban air quality. *Journal of the Air & Waste Management Association* 54(11), 1360-1371.

- Etheridge, D.M., Pearman, G.I. y Fraser, P.J. (1992). Changes in tropospheric methane between 1841 and 1978 from a high accumulation-rate Antarctic ice core. *Tellus B*, 44, 282–294.
- Falabella, D. y Carzoglio, E. (2010). Innovación tecnológica y causa de fallas en gasoductos. *Petrotecnia*, 4(10), 30-37.
- Field, R. A., Soltis, J., y Murphy, S. (2014). Air quality concerns of unconventional oil and natural gas production. *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 16(5), 954–969. <https://doi.org/10.1039/c4em00081a>.
- Frankenberg, C., Meirink, J. F., Bergamaschi, P., Goede, A. P. H., Heimann, M., Körner, S., Platt, U., van Weele, M., y Wagner, T. (2006). Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: Analysis of the years 2003 and 2004. *Journal of Geophysical Research*, 111(D7). <https://doi.org/10.1029/2005jd006235>.
- Gómez-Silva, B., Vilo-Muñoz, C., Galetović, A., Dong, Q., Castelán-Sánchez, H. G., Pérez-Llano, Y., Sánchez-Carbente, M. D. R., Dávila-Ramos, S., Cortés-López, N. G., Martínez-Ávila, L., Dobson, A. D. W., y Batista-García, R. A. (2019). Metagenomics of Atacama Lithobiontic Extremophile Life Unveils Highlights on Fungal Communities, Biogeochemical Cycles and Carbohydrate-Active Enzymes. *Microorganisms*, 7(12), 619. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7120619>.
- Gottwald, M., y Bovensmann, H. (2014). SCIAMACHY - Exploring the Changing Earth's Atmosphere. Springer Publishing.
- Griffa, B. (2019). Informe sobre el mercado del Gas Natural. *Centro de Investigación en Economía y Planeamiento Energético*.
- Hartmann, D. L., Klein Tank, A. M. G., Rusticucci, M., Alexander, I. V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F. J., Dlugokencky, E. J., Easterling, D. R., Kaplan, A., Soden, B. J., Thorne, P. W., Wild, M., y Zhai, P. M. (2013). Observations: atmosphere and surface, Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Hasekamp, O., Lorente, A., Hu, H., Butz, A., van de Brouck, J. y Landgraf, J. (2019). *Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor Methane Retrieval*, SRON-S5P-LEV2-RP-001. Netherlands Institute for Space Research.
- Hendler, A., Nunn, J., Lundeen, J. y McKaskle, R. (2006). VOC emissions from oil and condensate storage tanks. *Houston Advanced Research Center*.
- Hernández, M. E. (2010). Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana*, 28(2), 139-147.
- Houweling, S. (2000). Global modeling of atmospheric methane sources and sinks.

Huarte, A., Cifuentes, V., Gratton, R., y Clause, A. (2010). Correlation of methane emissions with cattle population in Argentine Pampas. *Atmospheric Environment*, 44(23), 2780–2786. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.03.012>.

IEA. (2017). World Energy Outlook 2017 IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>.

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.).

IPCC. (2018). *Climate Change 2018: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

IPCC. (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (eds.)). Cambridge University Press. In Press

Jacob, D. J., Turner, A. J., Maasackers, J. D., Sheng, J., Sun, K., Liu, X. y Frankenberg, C. (2016). Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(22), 14371-14396. doi: 10.5194/acp-16-14371-2016.

Japan Aerospace Exploration Agency y National Institute for Environmental Studies. (2011). *GOSAT / IBUKI Data Users Handbook*. 1st Edition.

Kaiser, J. W. (2001). Atmospheric parameter retrieval from UV-vis-NIR limb scattering measurements. University of Bremen.

Khalil, M. A. K. y Rasmussen, R. A. (1990). Atmospheric methane: recent global trends. *Environ. Sci. Technol*, 24, 549-553.

Kort, E. A., Frankenberg, C., Costigan, K. R., Lindenmaier, R., Dubey, M. K., y Wunch, D. (2014). Four corners: The largest US methane anomaly viewed from space. *Geophysical Research Letters*, 41(19), 6898–6903. <https://doi.org/10.1002/2014gl061503>.

Kunst, C. R., y Bravo, S. (2003). Ecología y régimen de fuego en la región chaqueña argentina. *Fuego en los ecosistemas argentinos*. Ediciones INTA, 109-118.

Landgraf, J., Lorente, A., Langerock, B. y Sha, M. K. (2019). *S5P Mission Performance Centre Methane (L2_CH4___) Readme*, S5P-MPC-SRON-PRF-CH4.

- Lichtenberg, G., Bovensmann, H., Van Roozendaal, M., Doicu, A., Eichmann, K. U., Hess, M., Gretschan, S., Kokhanovsky, A., Lerot, C., Noel, S., Richtern, A., Rozanov, A., Schreier, F. y Tilstra, L. G. (2015). *SCIAMACHY Offline Level 1b-2 ATBD Processor Algorithm Theoretical Baseline Document, ENV-ATB-QWG-SCIA-0085, issue 2B*.
- Liu, M., Lei, L., Liu, D., y Zeng, Z. C. (2016). Geostatistical Analysis of CH₄ Columns over Monsoon Asia Using Five Years of GOSAT Observations. *Remote Sensing*, 8(5), 361. <https://doi.org/10.3390/rs8050361>.
- Maenza, R. A., Agosta, E. A., y Bettolli, M. L. (2017). Climate change and precipitation variability over the western 'Pampas' in Argentina. *International Journal of Climatology*, 37, 445–463. <https://doi.org/10.1002/joc.5014>.
- Magrín, G. O. y Travasso, M. I. (2002). An integrated climate change assessment from Argentina. En O. C. Doering III et al (eds), *Effects of Climate Change and Variability on Agricultural Production Systems* (193-218). Springer Publishing.
- Mansilla, E. G. (2018). Estimación del secuestro de metano en suelos de forestaciones de la Provincia de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Martinez, P. A., Andrade, M. A., y Bidau, C. J. (2018). Potential effects of climate change on the risk of accidents with poisonous species of the genus *Tityus* (Scorpiones, Buthidae) in Argentina. *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*, 25, 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.sste.2018.03.002>.
- Mataloni, G. (2017). Subregión mallines y turberas de la Patagonia sur e islas del Atlántico sur. En *Regiones de humedales de la Argentina* (pp. 299-309). G.I.E.H.
- Mayer, E. W., Blake, D. R., Tyler, S. C., Makide, Y., Montague, D. C., & Rowland, F. S. (1982). Methane: Interhemispheric concentration gradient and atmospheric residence time. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 79(4), 1366–1370. <https://doi.org/10.1073/pnas.79.4.1366>.
- Mkhabela, M., y Manzi, M. (2017). Detection of potential methane gas pathways in deep South African gold mines. *Journal of Geophysics and Engineering*, 14(4), 960–974. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa6fc8>.
- Moore, C. W., Zielinska, B., Pétron, G., y Jackson, R. B. (2014). Air Impacts of Increased Natural Gas Acquisition, Processing, and Use: A Critical Review. *Environmental Science & Technology*, 48(15), 8349–8359. <https://doi.org/10.1021/es4053472>.
- NIES. (2019). *Processing Flow for FTS SWIR Level 2 Products (V02.80)*.
- Nisbet, E. G., Dlugokencky, E. J., Manning, M. R., Lowry, D., Fisher, R. E., France, J. L., Michel, S. E., Miller, J. B., White, J. W. C., Vaughn, B., Bousquet, P., Pyle, J. A., Warwick, N. J., Cain, M., Brownlow, R., Zazzeri, G., Lanoisellé, M., Manning, A. C., Gloor, E., . . . Ganesan, A. L. (2016). Rising atmospheric methane: 2007–2014 growth and isotopic shift. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(9), 1356–1370. <https://doi.org/10.1002/2016gb005406>.

- Nisbet, E. G., Fisher, R. E., Lowry, D., France, J. L., Allen, G., Bakkaloglu, S., Broderick, T. J., Cain, M., Coleman, M., Fernandez, J., Forster, G., Griffiths, P. T., Iverach, C. P., Kelly, B. F. J., Manning, M. R., Nisbet-Jones, P. B. R., Pyle, J. A., Townsend-Small, A., al-Shalaan, A., . . . Zazzeri, G. (2020). Methane Mitigation: Methods to Reduce Emissions, on the Path to the Paris Agreement. *Reviews of Geophysics*, 58(1). <https://doi.org/10.1029/2019rg000675>.
- Nori, J., Carrasco, P. A., y Leynaud, G. C. (2013). Venomous snakes and climate change: ophidism as a dynamic problem. *Climatic Change*, 122(1–2), 67–80. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1019-6>.
- Ontiveros, S., Manrique, S., y Franco, J. (2016). Flujos de metano (CH₄) en suelos forestales: dinámica y relación con factores ambientales y edáficos. En *XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES)*, (La Plata, 2016).
- Pasquini, A. I., Lecomte, K. L., y Depetris, P. J. (2008). Climate change and recent water level variability in Patagonian proglacial lakes, Argentina. *Global and Planetary Change*, 63(4), 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.07.001>.
- Perera, A. T. D., Nik, V. M., Chen, D., Scartezzini, J. L., y Hong, T. (2020). Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. *Nature Energy*, 5(2), 150–159. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0558-0>.
- Phillips, N. G., Ackley, R., Crosson, E. R., Down, A., Hutyrá, L. R., Brondfield, M., Karr, J. D., Zhao, K., y Jackson, R. B. (2013). Mapping urban pipeline leaks: Methane leaks across Boston. *Environmental Pollution*, 173, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.11.003>.
- Piovano, E. L., Ariztegui, D., y Moreira, S. D. (2002). Recent environmental changes in Laguna Mar Chiquita (central Argentina): a sedimentary model for a highly variable saline lake. *Sedimentology*, 49(6), 1371–1384. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2002.00503.x>.
- Podestá, G., Bert, F., Rajagopalan, B., Apipattanavis, S., Laciana, C., Weber, E., Easterling, W., Katz, R., Letson, D., y Menendez, A. (2009). Decadal climate variability in the Argentine Pampas: regional impacts of plausible climate scenarios on agricultural systems. *Climate Research*, 40, 199–210. <https://doi.org/10.3354/cr00807>.
- Puliafito, S. E., Bolaño-Ortiz, T., y Pascual Flores, R. (2020). High resolution inventory of atmospheric emissions from livestock production, agriculture, and biomass burning sectors of Argentina. *AtmEn*, 223, 117248.
- Sanucci, C. (2021a). HARP-CH4. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19450196>
- Sanucci, C. (2021b). CH4-GOSAT. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19450193>
- Saupe, E. E., Papes, M., Selden, P. A., y Vetter, R. S. (2011). Tracking a Medically Important Spider: Climate Change, Ecological Niche Modeling, and the Brown Recluse (*Loxosceles reclusa*). *PLoS ONE*, 6(3), e17731. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017731>.

- Schneising, O., Burrows, J. P., Dickerson, R. R., Buchwitz, M., Reuter, M., y Bovensmann, H. (2014). Remote sensing of fugitive methane emissions from oil and gas production in North American tight geologic formations. *Earth's Future*, 2(10), 548–558. <https://doi.org/10.1002/2014ef000265>.
- Schwank, J., Escobar, R., Girón, G. H., y Morán-Tejeda, E. (2014). Modeling of the Mendoza river watershed as a tool to study climate change impacts on water availability. *Environmental Science & Policy*, 43, 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.01.002>.
- SCIAMACHY Quality Working Group, SCIAMACHY Validation team e IDEAS+ (INstrument Data quality Evaluation and Analysis Service) team. (2018). *Product Quality README file for SCIAMACHY Level 2 version 6.01 dataset, ENVI-GSOP-EOGD-QD-16-0132, issue 1.2*.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2019). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero*. Autor.
- Secretaría de Gobierno de Energía. (2009). *Informe de anomalías térmicas y uso de imágenes DMSP-OLS en detección de venteo y quema de gas - Provincia de Neuquén*.
- Secretaría de Gobierno de Energía. (2019). *Consolidación de reservas de gas y petróleo de la República Argentina. Reporte Anual de Reservas – 2018*. (En línea). Disponible en: <https://bit.ly/3j2PHZa>.
- Seinfeld, J. H., y Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric Chemistry And Physics: From Air Pollution to Climate Change* (2.a ed.). Wiley-Interscience.
- Shoemaker, J. K., Schrag, D. P., Molina, M. J., y Ramanathan, V. (2013). What role for short-lived climate pollutants in mitigation policy?. *Science*, 342(6164), 1323-1324.
- Simonds, M., Xiao, H., y Levine, S. P. (1994). Optical remote sensing for air pollutants-review. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 55(10), 953-965.
- Soebijanta, V., Lambert, J. C., Meirink, J. F. y Peters, A. (2003). How to extract the geolocation of SCIAMACHY nadir pixels from the Level-2 data files.
- Sams, A. J. M. y Plugge, C. M. (2010). Chapter 2: The microbiology of methanogenesis. En Smith, P., Reay, D., Van Amstel, A. (eds), *Methane and Climate Change*, (14-18). Routledge.
- Turner, A. J., Frankenberg, C., y Kort, E. A. (2019). Interpreting contemporary trends in atmospheric methane. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(8), 2805–2813. <https://doi.org/10.1073/pnas.1814297116>.
- Urteaga, D. (2016). Monitoreo de las concentraciones atmosféricas de metano en la ciudad de Tandil: correlación con parámetros meteorológicos y estimación de emisiones fugitivas originadas por el consumo de gas natural. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

- Varon, D. J., McKeever, J., Jervis, D., Maasackers, J. D., Pandey, S., Houweling, S., Aben, I., Scarpelli, T., y Jacob, D. J. (2019). Satellite Discovery of Anomalously Large Methane Point Sources From Oil/Gas Production. *Geophysical Research Letters*, 46(22), 13507–13516. <https://doi.org/10.1029/2019gl083798>.
- Velázquez de Castro González, F. (2005). Cambio climático y protocolo de Kyoto. Ciencia y estrategias. Compromisos para España. *Rev. Esp. Salud Pública*, 79(2).
- Vera C. y Camilloni I. (2006). Vulnerabilidad de la Patagonia y sur de las provincias de Buenos Aires y La Pampa. *Enabling Study for the Second National Communication to the UNFCCC, Chapter 3.2*, SAYDS-Fundación e Instituto T. Di Tella, Buenos Aires, 54-88.
- Villafañe, V. E., Banaszak, A. T., Guendulain-García, S. D., Strauch, S. M., Halac, S. R., y Helbling, E. W. (2012). Influence of seasonal variables associated with climate change on photochemical diurnal cycles of marine phytoplankton from Patagonia (Argentina). *Limnology and Oceanography*, 58(1), 203–214. <https://doi.org/10.4319/lo.2013.58.1.0203>.
- Watson, T. L., y Bachu, S. (2009). Evaluation of the Potential for Gas and CO₂ Leakage Along Wellbores. *SPE Drilling & Completion*, 24(01), 115–126. <https://doi.org/10.2118/106817-pa>.
- World Meteorological Organization. (2020, noviembre). *WMO greenhouse gas bulletin* (N.º 16). WMO. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10437.
- Wunch, D., et al. (2011). A method for evaluating bias in global measurements of CO₂ total columns from space. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 12317-12337. doi:10.5182/acp-11-12317-2011.
- Yalew, S. G., van Vliet, M. T. H., Gernaat, D. E. H. J., Ludwig, F., Miara, A., Park, C., Byers, E., de Cian, E., Piontek, F., Iyer, G., Mouratiadou, I., Glynn, J., Hejazi, M., Dessens, O., Rochedo, P., Pietzcker, R., Schaeffer, R., Fujimori, S., Dasgupta, S., . . . van Vuuren, D. P. (2020). Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios. *Nature Energy*, 5(10), 794–802. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0664-z>.
- Yañez-Arenas, C., Townsend Peterson, A., Rodríguez-Medina, K., y Barve, N. (2015). Mapping current and future potential snakebite risk in the new world. *Climatic Change*, 134(4), 697–711. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1544-6>.
- Yoshida, Y., Eguchi, N., Ota, Y., Kikuchi, N., Nobuta, K., Aoki, T., Yokota, T. (2017). *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for CO₂, CH₄ and H₂O column amounts retrieval from GOSAT TANSO-FTS SWIR*. NIES GOSAT Project.
- Zavala-Araiza, D., Lyon, D., Alvarez, R. A., Palacios, V., Harriss, R., Lan, X., Talbot, R., y Hamburg, S. P. (2015). Toward a Functional Definition of Methane Super-Emitters: Application to Natural Gas Production Sites. *Environmental Science & Technology*, 49(13), 8167–8174. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00133>.