

INVENTARIO ARGENTINO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS DEL SECTOR ENERGÉTICO DE ALTA RESOLUCION: PARTE II RESULTADOS

PULIAFITO, SALVADOR E.^{1,2}; CASTESANA, PAULA S.^{2,3}, ALLENDE, DAVID G.¹, RUGGERI, MARÍA F.¹, PINTO, SEBASTIAN² Y GARIGLIO, ALEJO²

1: Facultad Regional Mendoza
Universidad Tecnológica Nacional/CONICET
Rodríguez 273, 5500 Mendoza
epuliafito@frm.utn.edu.ar, dallende@hotmail.com, m.florencia.ruggeri@gamail.com

2: Facultad Regional Buenos Aires
Universidad Tecnológica Nacional
Medrano 951, 1179 Buenos Aires
seba23.8@hotmail.com, gariglio.alejo@gmail.com

3: Instituto de Investigación en Ingeniería Ambiental
Universidad Nacional de San Martín
25 de Mayo 1401, 1650 Buenos Aires, Argentina
pcastesana@unsam.edu.ar

Resumen. *Se presenta los resultados de un inventario de alta resolución (2.5 km x 2.5 km), actualizado al año 2014, de las principales emisiones a la atmósfera provenientes de las actividades energéticas de Argentina. Se aprecia que el 18% de las emisiones residenciales se generan en las zonas rurales (< 2 500 hab/km²), 44% se generan en las zonas urbanas de densidad media (>= 2 500 < 7 500 hab/km²), el 38% restante se emiten en ciudades medias y densamente pobladas (> 7 500 hab/km²). Para las fuentes puntuales se observa que el 43% de las emisiones de dióxido de carbono (22 500 Gg) se emiten en la zona Pampeana (Buenos Aires, CABA y La Pampa) seguido del 24% (de la zona Centro (12 100 Gg), Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos y Santiago del Estero); el resto del país emite el (32%: 16 350 Gg). En el transporte la zona pampeana y central concentra el 60% de la actividad y las emisiones. En definitiva se aprecia una importante disparidad geográfica de las emisiones dependiendo del tipo de fuentes. Sin embargo las zonas urbanas concentran más del 75% de las emisiones en un territorio menor al 3%.*

Palabras clave: Inventario emisiones, Atmósfera, Sector energético, Alta Resolución Espacial

1. INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de este trabajo es presentar un inventario de emisiones atmosféricas, para la Argentina, con foco en las actividades del sector energético. Está organizado en forma de damero o mapa grillado con celdas de 0,025° longitud x 0,025° longitud (cartografía EPSG 4326, WGS84). La zona abarcada por este inventario va desde los 21° a 55° latitud Sur y 53 a 73° longitud Oeste, en unas 500 mil celdas que incluyen el sector continental y el marítimo costero de Argentina, con una extensión de 2 200 km x 3 600 km.

En la parte I de esta serie de artículos, desarrollamos ampliamente la metodología utilizada para la recopilación y organización de este inventario, por lo que sólo daremos una revisión muy breve del procedimiento. En esta parte nos concentraremos a mostrar algunos resultados relevantes enfatizando los conocimientos adquiridos en la distribución geográfica de las fuentes, frente a un inventario meramente agregado por provincias o nacional. Finalmente en la tercera parte de esta serie compararemos los resultados aquí presentados frente a otros inventarios internacionales.

2. METODOLOGÍA

Con el fin de ofrecer un producto compatible con distintas bases globales, este inventario ha sido organizado de acuerdo a las categorías propuestas por [1]. Comprende los sectores y especies o contaminantes según la Tabla 1 y los tipos de combustibles que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1: Sectores y contaminantes considerados

Cod.	Sector	Gases efecto invernadero ^{*1}	Gases precursores de ozono ^{*2}	Gases acidificantes ^{*3}	Particulados [*] ₄	Compuestos orgánicos ^{*5}	Metales ^{*6}
1A1a	Generación pública de electricidad	•	•	•	•	•	•
1A1b	Refinación de petróleo	•	•	•	•	•	•
1A3a	Aviación nacional	•	•	•	•		
1A3b	Transporte carretero	•	•	•	•		
1A3c	Transp. ferroviario	•	•	•	•		
1A3d	Transp. fluvial	•	•	•	•		
1A4	Residencial y comercial	•	•	•	•		
1B2	Emisiones fugitivas de petróleo y gas	•	•	•	•		
2A1	Producción de cemento	•	•	•	•	•	•

*1: CO₂, CH₄, N₂O; *2: CO, NO_x, NMVOC; *3: NH₃, SO₂; *4: PM₁₀, PM_{2.5}, TSP, BC

*5: Benzopireno, Benzoantraceno, Benceno, Xilenos, Tolueno, Clorobencenos, Naftaleno, HCB;

*6: Se, Ni, Pb, Hg, Zn, Cu

Según sea la extensión de la fuente: puntual, de línea o de área, que puede corresponder a los sectores industriales, del transporte o residenciales respectivamente, sus emisiones a la atmósfera pueden calcularse en forma general de la siguiente manera [2]:

$$E(p) = \sum_{p,j,k} [FE(p, j, k) \times A(j, k)] \quad (1)$$

Donde $E(p)$ es la emisión total para la especie o contaminante p , $FE(p, j, k)$ es el factor de emisión para la especie contaminante p , el tipo de fuente j y el combustible k , y $A(j, k)$ es el nivel de actividad para la fuente j .

Tabla 2: Combustibles considerados

Cod.	Sector	Líquidos	Gas Natural	GLP	Carbón	Biomasa	Leña	Crudo	Gas de Refinería
1A1a	Generación pública de electricidad	•	•		•	•			
1A1b	Refinación de petróleo	•						•	•
1A3a	Aviación nacional	•							
1A3b	Transporte carretero	•	•						
1A3c	Transp. ferroviario	•							
1A3d	Transp. fluvial	•							
1A4	Residencial y comercial		•	•	•	•	•		
1B2	Emisiones fugitivas de petróleo y gas	•						•	•
2A1	Producción de cemento	•	•						

Líquidos: Gasolina, Gas-Oil, Fuel-Oil

Las emisiones o la actividad relevada por área se distribuyeron espacialmente en la grilla de modelado por medio de coeficientes representativos para cada fuente (por ejemplo, tipo de uso de suelo, densidad de población, etc.), utilizando herramientas de sistemas de información geográficos (GIS) basándose en la ecuación (2):

$$\theta(i, x, y) = \theta(i) \times \left[\frac{\varphi(x,y)}{\varphi(i)} \right] \quad (2)$$

Donde $\theta(i,x,y)$ es el valor de emisión o la actividad en la celda ubicada en las coordenadas (x,y) ; $\theta(i)$ es la emisión o actividad conocida para la unidad de referencia i (provincia, departamento, fracción, área productiva, zona de influencia) que se desea distribuir espacialmente, $\varphi(x,y)$ es el coeficiente espacial puntual en la celda (x,y) y $\varphi(i)$ es el valor total del coeficiente atribuido a toda la unidad de referencia i .

Para las fuentes lineales (transporte) se puede calcular usando la Ec. 1, donde la actividad A queda definida por los vehículos-kilómetros transportados (VKT) en cada grilla, (o toneladas-kilómetros-transportados (TKT)), calculados a partir del consumo de combustible (y/o la carga transportada):

$$E_{RTS}(x, y, k, p) = VKT_{GRID}(x, y, k) \times F_{RTS}(k, p, v) \quad (3)$$

Donde E_{RTS} es la emisión correspondientes a la celda (x,y) de la grilla, el combustible k y contaminante p ; F_{RTS} es un factor de emisión que depende del tipo de vehículo v , combustible k y contaminante p (EMEP, 2013). Los VKT se calcula según la siguiente ecuación:

$$VKT_{GRID}(x, y, k) = Fuel_{GRID}(x, y, k) \times \gamma(k) \quad (4)$$

Donde $Fuel_{GRID}$ es el consumo de la celda (x,y) para el combustible k la eficiencia γ que depende de cada tipo de vehículo (ver Parte I en este Libro y [3]).

3. RESULTADOS

3.1 Emisiones residenciales y comerciales

El 98% del territorio está ocupado con una población total menor al 1,45% de los habitantes de Argentina (580 000 frente a 40 000 000 hab. totales) y las zonas urbanas de densidad media ($\geq 2500 < 7500$ hab./km²) ocupan el 0,68% del territorio con 22 300 000 habitantes, y las zonas densamente pobladas (> 7500 hab./km²) se distribuyen en el 0.06% (< 190 000 ha) del territorio con 13 200 000 habitantes (Figura 1). Para el cálculo de las emisiones residenciales se consideraron el consumo de gas natural, gas licuado y leña tanto para cocción (incluyendo los tradicionales asados) como para calefacción (similar a [4]). Las emisiones comerciales incluyen las del sector gubernamental (Oficinas públicas, hospitales, escuelas, etc.). Las emisiones a la atmósfera por el uso de electricidad se tienen en cuenta en la sección siguiente de emisiones de centrales térmicas.

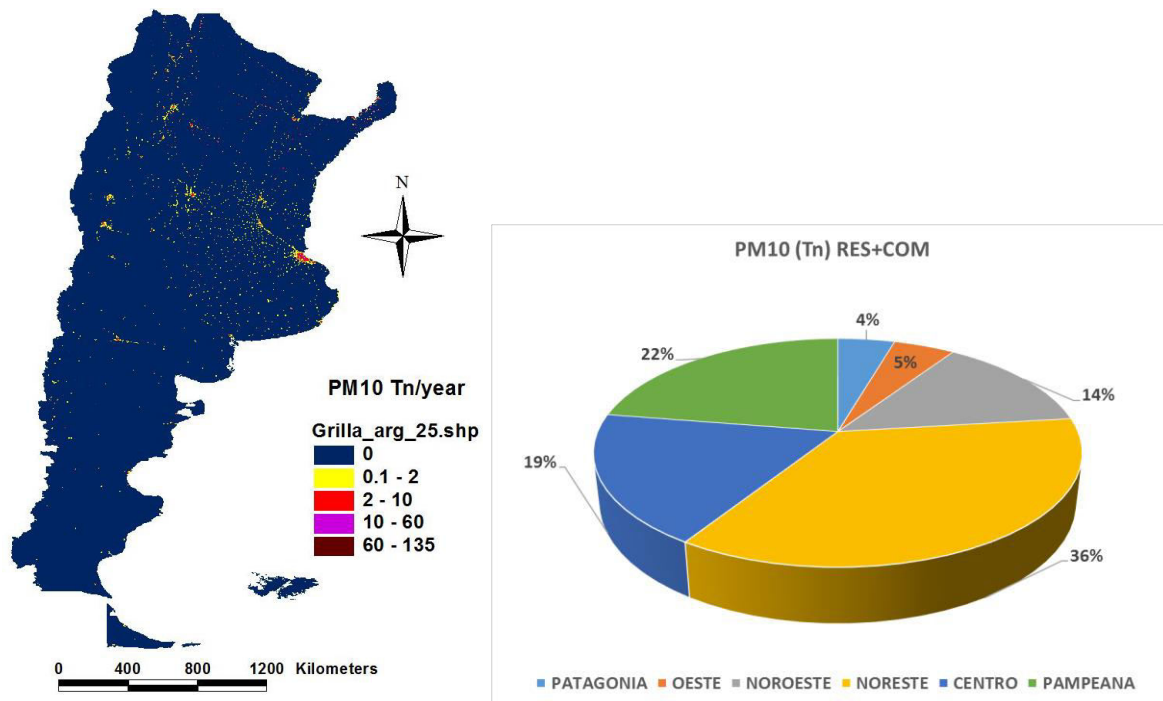


Figura 1: Emisiones de PM10 del sector residencial y comercial.

(Zonas Geográficas: Incluyen las siguientes provincias: *Patagonia*: Neuquén, Río Negro, Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego; *Oeste*: La Rioja, Mendoza, San Juan, San Luis; *Noroeste*: Catamarca, Jujuy, Salta Tucumán; *Noroeste*: Corrientes, Chaco, Formosa, Misiones; *Centro*: Córdoba, Entre Ríos Santiago del Estero y Santa Fe; *Pampeana*: Buenos Aires, Ciudad de Buenos Aires y La Pampa; Ver Figura 2).

La Tabla 3 muestra la distribución de las emisiones del sector residencial y comercial en función de la densidad poblacional de las celdas. Se aprecia que el 18% de las emisiones se

generan en las zonas rurales ($< 2\,500$ hab/km²), 44% se generan en las zonas urbanas de densidad media ($\geq 2\,500 < 7\,500$ hab/km²) que corresponden a zonas del tipo residencial, el 38% restante se emiten en ciudades medias y densamente pobladas ($> 7\,500$ hab/km²).

Tabla 3: Emisiones anuales (Mg/año) del sector residencial y comercial en función de la densidad poblacional de las celdas.

Dens. Hab/Km2	CO2	NOX	CH4	CO	N2O	VOC	SO2	PM10	PM25
< 100	192 953	380	106	2 878	2	171	50	423	423
$\geq 100 < 1000$	1 730 579	3 664	764	20 886	18	1 240	367	3 029	3 029
$\geq 1000 < 2500$	3 502 961	8 151	930	25 738	29	1 521	440	3 575	3 575
$\geq 2500 < 5000$	6 803 417	17 049	787	22 931	35	1 325	352	2 753	2 753
$\geq 5000 < 7500$	6 907 071	17 702	481	14 949	28	844	209	1 504	1 504
$\geq 7500 < 10000$	5 042 579	12 916	367	11 318	20	640	154	1 160	1 160
>10000	6 713 349	17 385	339	11 209	30	623	174	948	948
TOTAL	30 892 910	77 246	3 774	109 909	163	6 365	1 745	13 393	13 393

3.2 Fuentes puntuales

La Tabla 4 muestra la generación de electricidad, la producción de cemento y la refinación de crudo agrupado por grandes zonas geográficas para el año 2014. Se observa una importante concentración de producción en la zona de Buenos Aires, consistente con la mayor población del país en esa provincia. Las emisiones para estas fuentes puntuales junto a la generación térmica de electricidad se muestran en la Tabla 5 para todos los contaminantes considerados.

Tabla 4: Producción anual en plantas de cemento, refinerías y generación de electricidad

Producción Zona	Cemento (Mg)	Refinación Crudo (Mg)	Electricidad	
			Potencia (MW)	Energía (GWh)
PATAGONIA	1 800 000	1 712 909	7 490	23 002
OESTE	1 374 000	5 850 593	1 835	5 739
NOROESTE	780 000	732 507	3 048	13 002
NORESTE			2 007	11 229
CENTRO	780 000	2 048 465	5 614	18 293
PAMPEANA	3 380 000	21 439 793	11 282	53 069
TOTALES	8 114 000	31 784 267	31 280	124 338

Tabla 5: Emisiones anuales provenientes de grandes fuentes puntuales (Mg/año)

Sector	CO2	NOX	CH4	CO	N2O	VOC	SO2	PM10	PM25
CEN. TERMICAS	40 329 848	158 681	4 582	29 458	1 208	6 352	49 407	3 811	2 779
REFINERIA(a)	6 444 204	14 347	43 456	4 480	37	96 649	26 912	724	724
PR. CEMENTO	4 134 000	10 063	-	11 823	-	150	3 029	654	686
TOTAL	50 908 052	183 091	48 038	45 761	1 246	103 151	79 348	5 189	4 188

(a) Incluye las emisiones propias de la producción y del consumo de combustible; venteo y emisiones de antorchas.

La Figura 2 muestra las emisiones de CO₂ (Gg) producidas por refinerías, centrales térmicas y plantas de producción de cemento. Se observa que el 43% de las emisiones de dióxido de carbono (22 500 Gg) se emiten en la zona Pampeana (Buenos Aires, CABA y La Pampa) seguido del 24% (de la zona Centro (12 100 Gg), Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos y Santiago del Estero); el resto del país emite el (32%: 16 350 Gg).

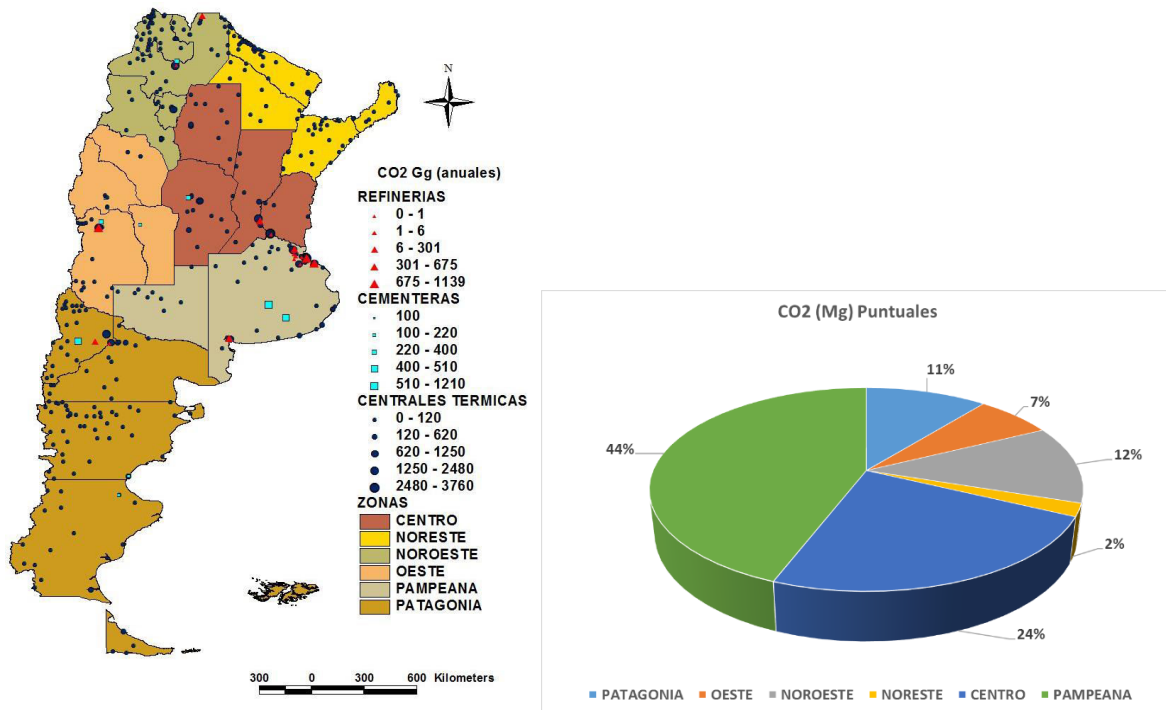


Figura 2: Distribución espacial de las emisiones de CO2 (Gg/año) centrales térmicas, cementera y refinerías por producción de calor o electricidad.

3.3 Emisiones del transporte

La Tabla 6 muestra las emisiones anuales provenientes del sector transporte tanto carretero, navegación fluvial, de ferrocarriles y aéreo.

Tabla 6: Emisiones anuales (Mg/año) provenientes del sector transporte.

Sector	CO2	NOX	CH4	CO	N2O	VOC	SO2	PM10	PM25
AEREO	2 223 906	10	59	6 416	71	382	697	71	71
CARRET.	49 913 098	470 000	17	1 548 000	4	401 000	14	31	3
FF.RR.	236 605	3 948	14	806	2	350	-	108	103
NAVEG.	3 975 655	49 756	4.4	4 667	1 261	1 735	12 614	2 388	2 171
TOTAL	56 349 264	523 714	95	1 559 889	1 338	403 467	13 325	2 598	2 348

La Figura 3 muestra el consumo o venta de combustibles del sector de transporte carretero, y cómo este consumo se traduce en actividad distribuida en las rutas en forma de vehículo-km recorrido. Se muestra además las emisiones de NOx para este subsector. La zona pampeana y central concentra el 60% de la actividad y las emisiones. Este subsector impacta fuertemente en las zonas rurales. La navegación marítima y fluvial tiene un importante impacto en las emisiones de NOx, PM10 y SO2 debido al uso de fuel oil como principal combustible. En la Figura 3 (Abajo, der.) la referencia a zonas rurales o urbanas para la navegación fluvial se refieren al tipo de zona adyacente a los puertos, muelles y zonas del entorno fluvial.

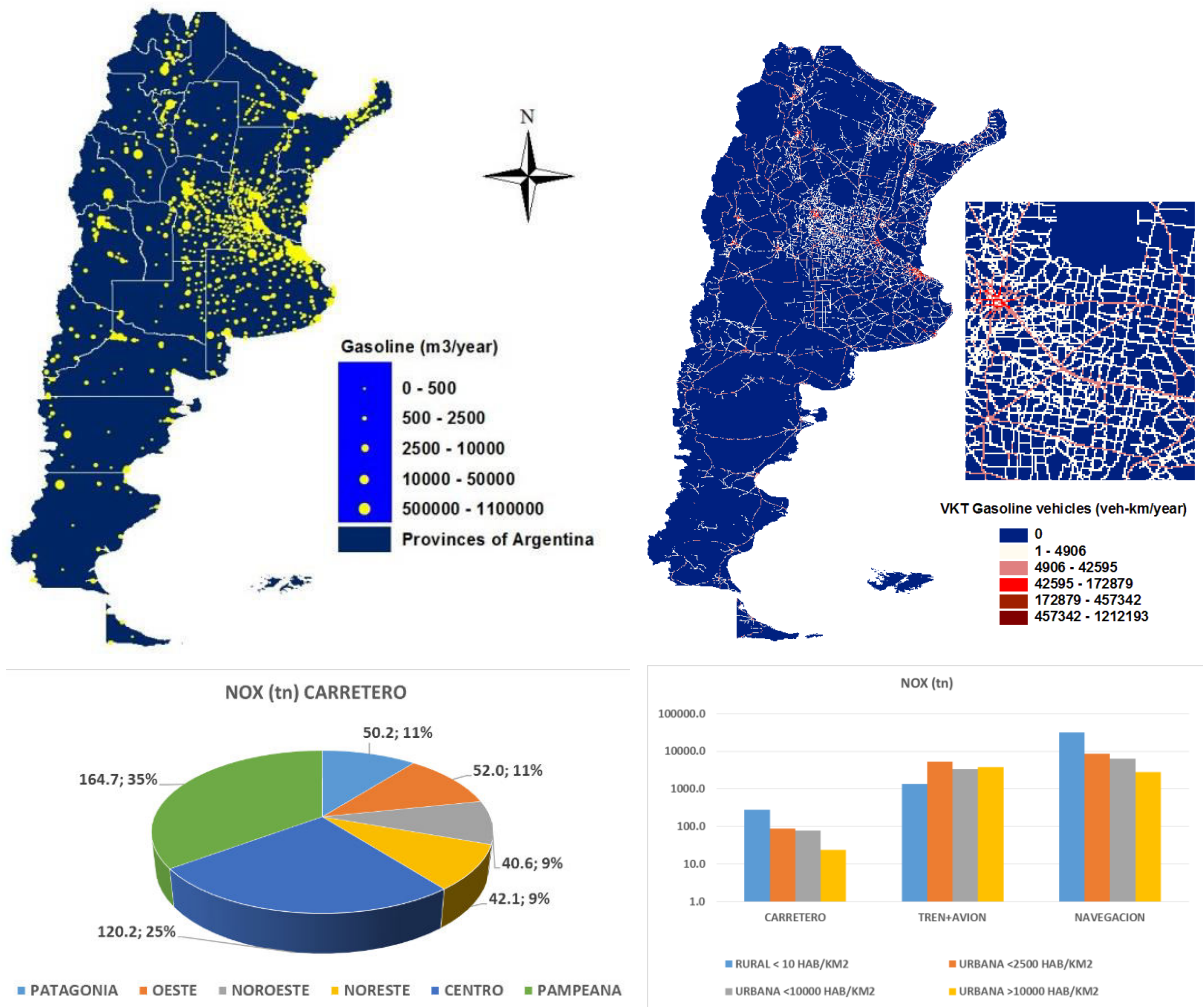


Figura 3: Consumo, actividad y emisiones del sector de transporte carretero. Izquierda: Venta de gasolina en estaciones de servicio (m³/año); derecha: actividad medida como VKT para vehículos de pasajeros de gasolina (veh-km/año). Abajo Izq.: Emisiones de NOx del transporte carretero. Abajo Der.: Emisiones de NOx en función del tipo de urbanización.

3.4 Resultados generales

La figura 4 muestra el total de emisiones incluidas en este inventario para dos contaminantes primario: PM2.5 y monóxido de carbono. Puede apreciarse la distinta proporción atribuible a cada tipo de fuente. Mientras que el PM2.5 tiene una componente importante el sector residencial, en especial por el uso de leña, seguido del de navegación por uso de fuel oil. En cambio par CO la fuente principal la constituye el sector transporte carretero, en especial los automóviles. Los mapas indican claramente la mayor concentración de contaminantes a la atmósfera en los centros urbanos principales.

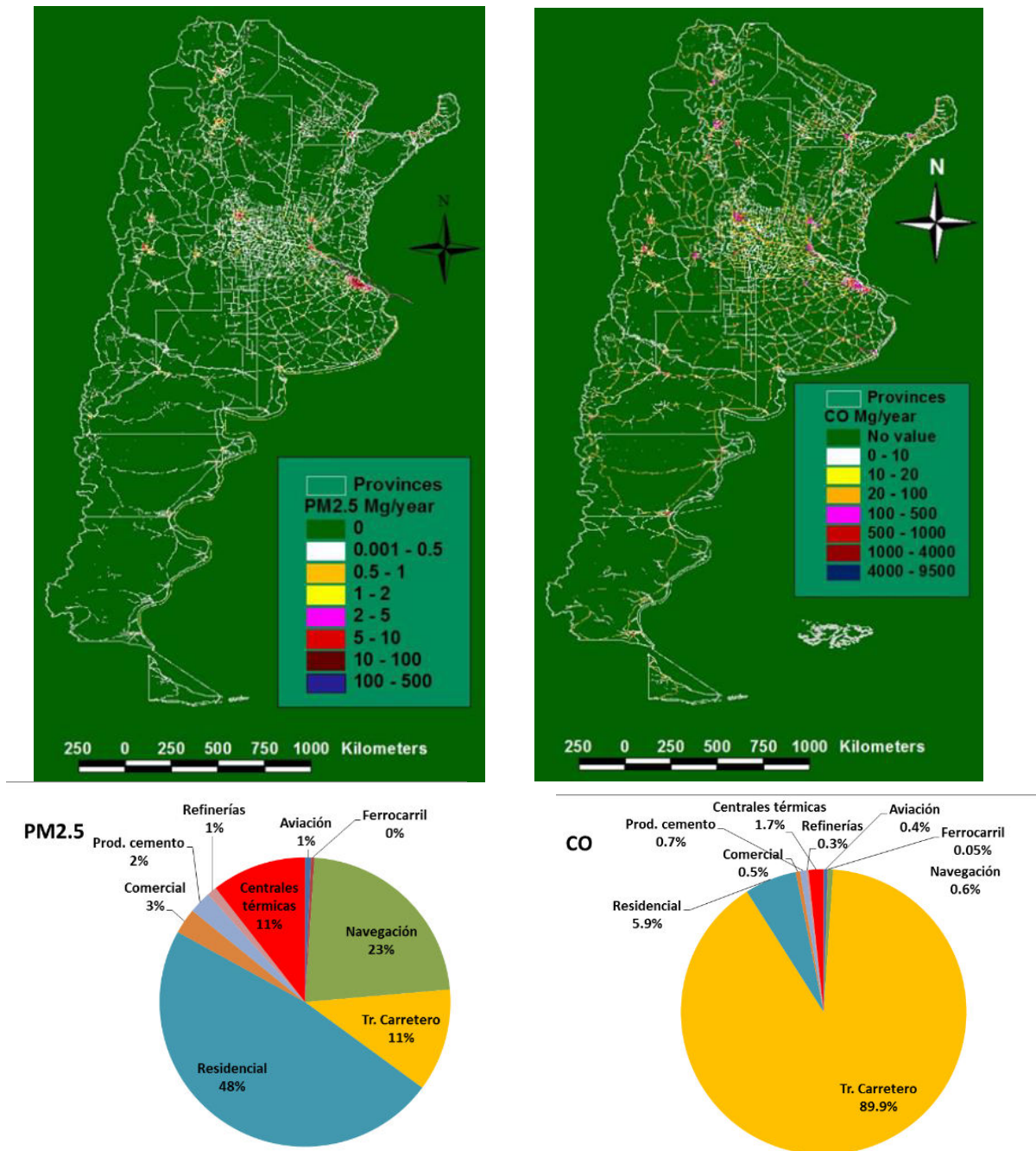


Figura 4: Inventario nacional de emisiones en toneladas por año por celda. Arriba: a) Material particulado fino PM 2.5 y b) Monóxido de carbono. Abajo: Proporciones emitidas de acuerdo al tipo de fuente considerada.

La Tabla 7 indica los resultados totales por sectores y contaminantes calculados.

Tabla 7: Emisiones totales por sectores (Mg/año).

Sector	CO2	NOX	CH4	CO	N2O	VOC	SO2	PM10	PM25
GPE	40 329 848	158 681	4 582	29 458	1 208	6 352	49 407	3 811	2 779
REF	6 444 204	14 347	43 456	4 480	37	96 649	26 912	724	724
AVD	2 223 906	10	59	6 416	71	382	697	71	71
TRC	49 913 098	470 000	17	1 548 000	4	401 000	14	31	3
FRC	236 605	3 948	14	806	2	350		108	103
NFN	3 975 655	49 756	4	4 667	1 261	1 735	12 614	2 388	2 171
RES	30 892 910	77 246	3 774	109 909	163	6 365	1 745	13 393	13 393
FUG	1 792 000	2 200	43 370	2 700	29	77 270	26 590	690	690
CEM	4 134 000	10 063		11 823		150	3 029	654	686
TOTAL	139 942 226	786 251	95 276	1 718 259	2 775	590 253	121 008	21 870	20 620

GPE: Generación pública de electricidad; REF: Refinerías de petróleo; AVD: Aviación nacional; TRC: Transporte carretero; FRC: Ferrocarril; NFN: Navegación fluvial nacional; RES: Residencial y comercial; FUG: Emisiones fugitivas por venteo en refinerías; CEM: Producción de Cemento.

4. CONCLUSIONES

En la parte I de esta serie de artículos “Aspectos metodológicos” describimos la elaboración de este inventario nacional de emisiones a la atmosfera, las fuentes de datos y el proceso de desagregación espacial. En este segundo artículo nos concentramos en mostrar los principales resultados. En una tercera parte se incluye una comparación con otras bases de datos nacionales e internacionales.

Algunas conclusiones de este trabajo son:

- Respecto de las emisiones residenciales el 18% se generan en las zonas rurales ($< 2\,500$ hab/km²), 44% se generan en las zonas urbanas de densidad media ($\geq 2\,500 < 7\,500$ hab/km²) que corresponden a zonas del tipo residencial, el 38% restante se emiten en ciudades medias y densamente pobladas ($> 7\,500$ hab/km²).
- Para las fuentes puntuales se observa que el 43% de las emisiones de dióxido de carbono (22 500 Gg) se emiten en la zona Pampeana (Buenos Aires, CABA y La Pampa) seguido del 24% (de la zona Centro (12 100 Gg), Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos y Santiago del Estero); el resto del país emite el (32%: 16 350 Gg).
- En el transporte la zona pampeana y central concentra el 60% de la actividad y las emisiones.
- Del total de 140 Tg de emisiones de CO₂, el 42% proviene del transporte, 36% de las fuentes puntuales consideradas y 22% del sector residencial y comercial
- De un total de 786 Gg de emisiones de NOx el 70% es producido por el transporte seguido del 21% de las fuentes puntuales
- Del total de 1,7 Tg de CO, el 91% lo genera el transporte.

La elaboración de este tipo de inventarios nos permite determinar que la participación de cada

sector interviniente no impacta lo mismo en zonas rurales que urbanas, no es lo mismo el impacto de un contaminante que otro. Así por ejemplo, si se desea diseñar una política de reducción de emisiones a la atmósfera y gases de efecto invernadero, debemos buscar medidas de optimización de las emisiones del sector transporte, ya que éste participa con un porcentaje importante. En especial dentro de este sector el sector carretero, y en éste último se comparte casi en partes iguales el automóvil particular y el transporte de cargas terrestre (camión). De igual modo, los datos generados permiten distinguir no sólo el impacto de cada sector sino su ubicación geográfica de detalle.

En trabajos posteriores se espera incluir otros sectores importantes para el país, como el sector agrícola, la generación de residuos y las emisiones específicas industriales.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por el apoyo a esta investigación. Este trabajo se realizó en el marco de los proyectos PID UTN IFI 1799 y 1487; CONICET PIP 112 201101 00673 y PICT 2012-1021.

REFERENCIAS

- [1] IPCC(2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.(S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, Eds.). Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- [2] EMEP (2016). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 Technical guidance to prepare national emission inventories. Copenhagen, Denmark.
- [3] Puliafito, E., Allende, D., Pinto, S., & Castesana, P. (2015). High resolution inventory of GHG emissions of the road transport sector in Argentina. *Atmospheric Environment*, 101, 303–311.
- [4] Trossero, M., Drigo, R., Anschau, A., Carballo, S., & Flores Marco, N. (2009). Análisis del balance de energía derivada de biomasa en Argentina. Análisis espacial de la producción y consumo de biocombustibles aplicando la metodología de “Mapeo de Oferta y Demanda Integrada de Dendro combustibles”(Wood fuel Integrated Supply/Demand Ove. (Eduardo Beaumont Roveda, Ed.). WISDOM ARGENTINA. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/011/i0900s/i0900s00.htm>