

# Inventario de emisiones atmosféricas del sector energético argentino\*

**Enrique Puliafito<sup>1,2</sup>, Paula Castesana<sup>2,3</sup>, David Allende<sup>1</sup>,  
Florescia Ruggeri<sup>1</sup>, Sebastián Pinto<sup>2</sup> y Romina Pascual<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Grupo de Estudios Atmosféricos y Ambientales, Rodríguez 273 (M5502AJE) Ciudad de Mendoza, Argentina

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Medrano 951, (C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

<sup>3</sup> Universidad Nacional de San Martín, Instituto de Investigación en Ingeniería Ambiental, 25 de Mayo 1401, 1650 Buenos Aires, Argentina

*enrique.puliafito@gmail.com*

*Recibido el 9 de noviembre de 2017, aprobado el 14 de diciembre de 2017*

## Resumen

Se presentan los detalles metodológicos para la preparación de un inventario de alta resolución (2,5 km × 2,5 km), de las principales emisiones a la atmósfera provenientes de las actividades energéticas de Argentina. Los subsectores considerados son: generación pública de energía eléctrica, refineras de petróleo, producción de cemento, transporte (marítimo, aéreo, ferroviario y caminero), residencial y comercial. Los contaminantes considerados incluyen gases de efecto invernadero y precursores de ozono: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, VOC; y otros indicadores específicos de calidad del aire como PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>x</sub>, Pb, POPs entre otros. Se describe la desagregación espacial utilizada para estimar las emisiones de provenientes de fuentes de naturaleza diversas como residenciales, vehiculares, o industriales, a fin de tener un mapa grillado único que pueda usarse en modelos regionales de calidad del aire que mejore o complete las bases de datos existentes. Se aprecia que el 18% de las emisiones residenciales se generan en las zonas rurales (< 2 500 hab/km<sup>2</sup>), 44% se generan en las zonas urbanas de densidad media (>= 2 500 < 7 500 hab/km<sup>2</sup>), el 38% restante se emiten en ciudades medias y densamente pobladas (> 7 500 hab/km<sup>2</sup>). 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

\* 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.

## Abstract

This study presents methodological details for the preparation of a high-resolution spatially inventory (2,5 km × 2,5 km), of the main emissions from energy activities in Argentina. The sub-sectors considered are public generation of electricity, oil refineries, cement production, transport (maritime, air, rail and road), residential and commercial. Contaminants considered include greenhouse gases and ozone precursors: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, VOC; and other specific air quality indicators such as PM<sub>10</sub>, and PM<sub>2.5</sub>. The main contribution of this work is a better geographical allocation of the sources considered using population maps of census tracts. The article presents the used spatial disaggregation for the emission estimation from diverse sources such as residential, transport, or industrial in a unique gridded map suitable for using in air quality modeling. Main results show that 18% of residential emissions are generated in rural zones (< 2 500 hab/km<sup>2</sup>), 44% in medium density urban areas and 38% in highly density urban areas (> 7 500 hab/km<sup>2</sup>). Point sources emit 43% of carbon dioxide emissions in the Pampean region (Buenos Aires, CABA y La Pampa) followed by 24% (de la in the Central region (12 100 Gg), Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos y Santiago del Estero); while the rest of the country emits 32% (16 350 Gg). Sixty percent of transport sector emissions are also concentrated in the Central and Pampean region. Finally it can be seen considerable geographical disparity of the emissions depending on the source type. However urban concentrate more than 75% of total emissions in only 3% of the territory.

**KEYWORDS:** EMISSIONS INVENTORY – ATMOSPHERE - ENERGY SECTOR - HIGH SPATIAL RESOLUTION

## Introducción

Los inventarios de emisiones atmosféricas (IEA) se usan activamente para determinar los balances nacionales de gases de efecto invernadero (GHG), para evaluar el impacto ambiental de una nueva instalación y especialmente asociados a modelos de calidad del aire como por ejemplo: WRF / Chem (Grell, *et al.*, 2005), CMAQ (Binkowski, & Roselle, 2003), CALPUFF (Scire, *et al.*, 2000) or AERMOD (Cimorelli, A., *et al.*, 1998), entre otros. Los datos usados en los IEA se recopilan y organizan espacialmente para diversas escalas y resoluciones, tanto a nivel global, regional, nacional o local, a partir del relevamiento detallado de actividades.

Para la zona de Sudamérica no existen inventarios regionales o nacionales completos, salvo los compilados en la base de dato global EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) (EDGAR, 2016; Crippa *et al.*, 2016). En su formato reciente EDGAR es un IEA en forma de grilla de 0,1° longitud x 0,1° latitud de resolución.

Alonso, *et al.* (2010), presenta un inventario de Sudamérica para emisiones vehiculares basado en inventarios locales de 9 ciudades, extrapolando información socio económica de la región y asociándola con el uso de datos satelitales de alta resolución. Gallardo *et al.* (2012) muestran un inventario de emisiones vehiculares para cuatro megaciudades de Sudamérica (Bogotá, Santiago, Buenos Aires y Sao Pablo). Brasil tiene varios inventarios de emisiones por quema de biomasa (Longo *et al.*, 2013) y de actividades urbanas en el sur de Brasil (Andrade *et al.*, 2015). Puliafito *et al.*, (2015) presentaron un inventario de actividades y emisiones vehiculares con una resolución de 9 km x 9 km para Argentina. En comparación con Puliafito *et al.*, (2015) se utilizó una metodología similar para las emisiones vehiculares, pero en vez del mapa de luces nocturnas (*Earth at night*) se trabajó con una nueva base de datos poblacionales de mayor resolución (basada en radios censales) publicada por la agencia de estadística de Argentina INDEC (INDEC, 2016), lo que permitió aumentar la resolución de 9 km x 9 km a 2,5 km x 2,5 km, con la consiguiente mejora en la distribución espacial.

El objetivo de este inventario es ofrecer a la comunidad interesada un mapa actualizado de

las principales emisiones producto de las actividades energéticas mencionadas, y ofrecer un marco metodológico extrapolable a otras zonas de interés que aún no tengan desarrollados inventarios de alta resolución. Finalmente, este inventario puede mejorar los resultados y pronósticos de los modelos de calidad del aire o de transporte de contaminantes en Argentina por contar con una mejor descripción espacial de las fuentes emisoras.

## Metodología

En este trabajo se presenta la elaboración de los IEA para las siguientes actividades:

- a) Generación de energía eléctrica de centrales térmicas.
- b) Transformación de energía en grandes fuentes puntuales: emisiones directas y fugitivas en refinerías y plantas de producción de cemento.
- c) Consumo residencial de gas natural, gas licuado y biomasa.
- d) Actividad del transporte: carretero, ferrocarril, fluvial y aviación. Emisiones directas y fugitivas por carga y descarga de combustibles en estaciones de servicio.

Los contaminantes considerados se muestran en la Tabla 1 según corresponda a cada tipo de fuente, de acuerdo a la clasificación del IPCC (IPCC, 2006).

## Zona de estudio y grilla de base

La República Argentina está organizada políticamente en 2 divisiones jerárquicas principales: en 24 Provincias y dentro de éstas los Departamentos (554 en total) (Figura 1) cubriendo un área continental de 2 778 mil km<sup>2</sup>. La mayoría de las fuentes de datos de consumos y usuarios de energía, gas en red, agua en red, disponibilidad de cloacas, etc., están desagregados en estas dos grandes divisiones geográficas, y por tipo de usuario o sector (residencial, industrial, comercial). Debe destacarse que algunos departamentos son de extensión muy grande y que cubren áreas tanto urbanas como rurales, por lo que la información puede hallarse muy suavizada. El promedio de extensión departamental es de 5 700 km<sup>2</sup> con un mínimo de 3,55 km<sup>2</sup> y máximo de 63 700 km<sup>2</sup>.

La información referente a cada fuente se volcó en una grilla con celdas de 0,025° longitud x 0,025° latitud (cartografía EPGS 4326, WGS84)

en una zona que abarca desde 21° a 55° latitud Sur y 53° a 73° longitud Oeste. De esta manera, la zona de estudio resulta en unas 500 mil celdas correspondientes al sector continental y marítimo costero de Argentina.

La información poblacional se obtuvo de los mapas de radios y fracciones censales (MRFC) publicados recientemente y elaborada a partir del censo realizado en el año 2010 (INDEC, 2006). Un radio censal es la unidad geográfica mínima usada por los censistas compuesta por un promedio de 300 hogares, pero con una población y extensión variable. Las fracciones pueden incluir varios radios censales, representando localidades (rurales o urbanas) con poblaciones menores a 3000 personas (promedio 760, desv. 450) y con un número de viviendas que oscila entre 300 y 1000 hogares (promedio 230, desv. 120). Otra base de datos recientemente disponible en 2016 (MINEM, 2016) incluye otras actividades, como localización de estaciones de servicio, venta de combustibles, cantidad de usuarios de gas natural, consumo de combustibles en centrales térmicas con desagregación espacial variable.

Dada la variabilidad en extensión geográfica se intersectaron los MRFC con la grilla base, trans-

firiendo a las celdas de la grilla los datos de los radios y fracciones tales como población, número de vivienda y toda otra información disponible relevante para este inventario. La Figura 1 muestra las distintas escalas asociadas a la información disponible. La concentración urbana de Argentina se concentra en el 4% del territorio continental. De dicha población, el 52% vive en centros urbanos con densidades mayores a 7500 hab. / km<sup>2</sup>, ocupando sólo un 0,11% del territorio.

### Enfoque general

Las emisiones a la atmósfera se calcularon en forma general de la siguiente manera EMEP (2016):

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

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 o contaminante  $p$ , el tipo de fuente  $j$  y el combustible  $k$ , y  $A(j, k)$  es el nivel de actividad para la fuente  $j$  y combustible  $k$ .

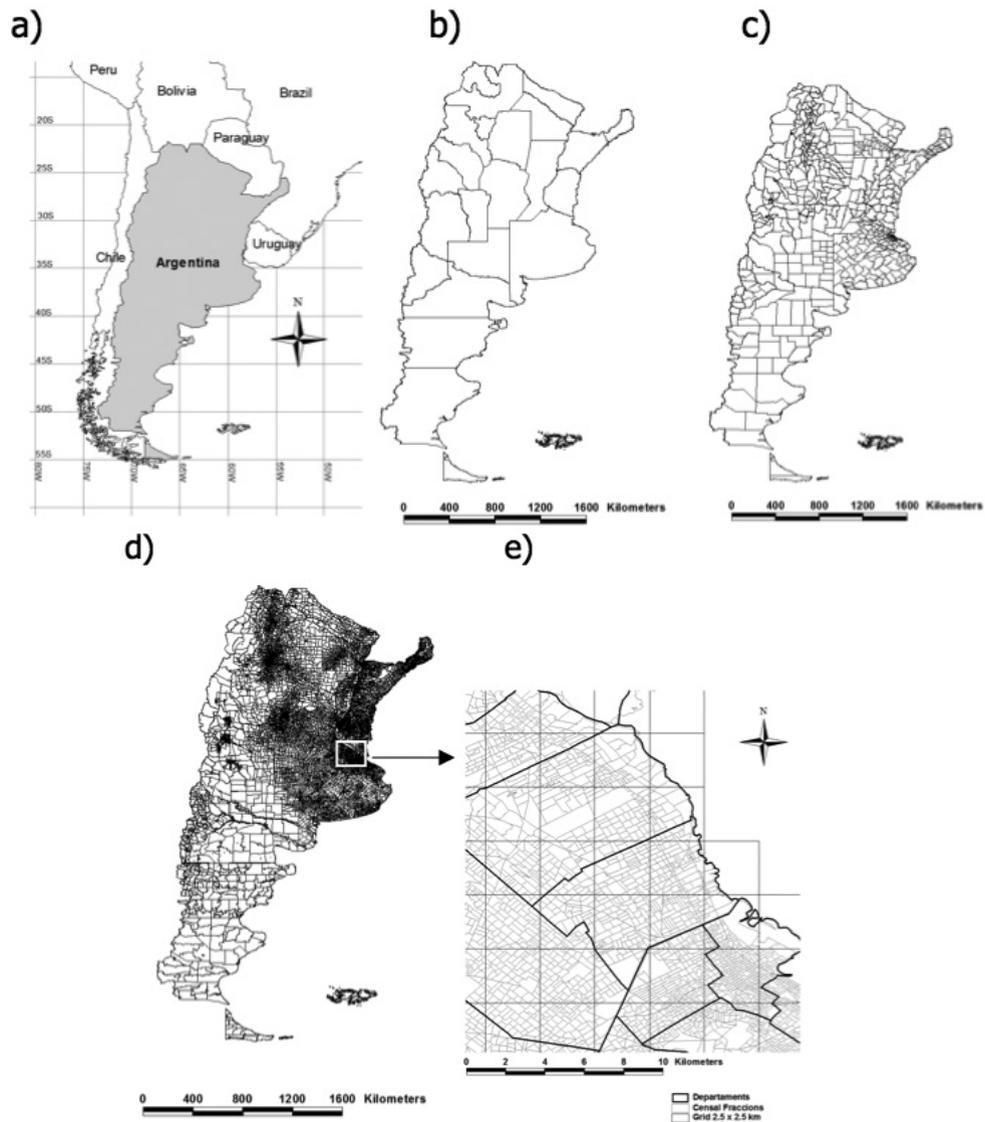
**Tabla 1. Sectores y contaminantes considerados**

Cod.	Sector	Gases efecto invernadero* <sup>1</sup>	Gases precursores de ozono* <sup>2</sup>	Gases acidificantes* <sup>3</sup>	Particulados* <sup>4</sup>	Compuestos orgánicos* <sup>5</sup>	Metales* <sup>6</sup>
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: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O; \*2: CO, NO<sub>x</sub>, NMVOC; \*3: NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>; \*4: PM10, PM2.5, TSP, BC

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

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



**Fig. 1. Unidades espaciales utilizadas en el inventario**

a) Argentina en Sudamérica; b) provincias, c) departamentos d) fracciones y radios censales (los recuadros corresponden a los detalles de la figura e); e) vista en detalle de la grilla usada (recuadrado gris), las fracciones censales (polígonos grises más pequeños) y departamentos (línea oscura).

### Emisiones de grandes fuentes puntuales

#### A) Emisiones de centrales térmicas

Para estimar las emisiones del sector de generación de energía eléctrica en grandes centrales térmicas, se consideraron los equipamientos de cada central y los consumos anuales de combustible (MINEM, 2016). Se consideraron 66 centrales térmicas operadas a gas natural, 173 operadas a diesel, 10 a fuel-oil, 1 a carbón y 6

operadas con biomasa (Tabla 2). En este caso, la ecuación (1) se reescribe como sigue:

$$E_{CT}(j, k, p) = A_{CT}(j, k) \times F_{CT}(k, p) \quad (2)$$

donde  $E_{CT}$  es la emisión de la central  $j$ ,  $k$  es el combustible y  $p$  el contaminante considerado,  $A_{CT}$  es la energía anual generada y  $F_{CT}$  es el factor de emisión utilizado (EMEP, 2016).

**Tabla 2. Combustible y energía eléctrica generada en centrales térmicas (base anual)**

Centrales Térmicas	Cantidad	Consumo Combustible	Energía eléctrica producida GWh
Gas natural (1000 m <sup>3</sup> )	66	13,727,472	63,666
Gas Oil-Diesel (ton)	173	1,523,579	8,830
Fuel Oil (ton)	10	2,714,938	10,182
Carbón (ton)	1	1,004,247	2,405
Biomasa (ton)	6	150,673	303
<b>TOTAL</b>	<b>256</b>		<b>85,386</b>

**B) Emisiones directas y fugitivas de refinerías**

En esta sección se consideran las emisiones atmosféricas debidas a la producción propia de calor y electricidad en las refinerías, y por emisiones fugitivas de la producción de los subproductos derivados. Para esta sección se consultaron las tablas de producción, ventas, consumo propio, exportaciones e importaciones de combustibles compiladas en (MINEM, 2016; IPA, 2015).

Las emisiones por producción propia de calor o electricidad se estimaron a partir del consumo propio:

$$E_{HREF}(j, p) = Fuel_{PRO}(j, k) \times L_{HV}(k) \times F_{FUEL}(k, p) \quad (3)$$

donde  $E_{HREF}$  es la emisión del contaminante  $p$  por consumo propio ( $Fuel_{PRO}$ ) del combustible  $k$  producido en la refinería  $j$ ,  $F_{FUEL}$  es el factor de emisión correspondiente tomado del IPCC y en concordancia con la tercera comunicación nacional de Argentina (TCNA, 2015),  $L_{HV}$  es el poder calorífico inferior del combustible considerado. Para las emisiones fugitivas se siguió el procedimiento propuesto por EMEP (EMEP, 2016). Las mismas fueron calculadas a partir de los productos procesados anuales:

$$E_{FUG\_REF}(j, p) = Oil_{PROC}(j) \times F_{FUG}(p) \quad (4)$$

donde  $E_{FUG\_REF}$  es la emisión a la atmósfera del contaminante  $p$  debido a la cantidad anual de crudo procesado ( $Oil_{PROC}$ ) en la refinería  $j$ , y  $F_{FUG}$  es el factor de emisión correspondiente.

**C) Emisiones de plantas de cemento**

Se consideraron 10 plantas productoras de

cemento en Argentina y se calcularon las emisiones provenientes del consumo de combustibles y las propias de la producción del Clinker, siguiendo la ecuación (1). Se usaron los factores de emisión de EPA (2016) y datos de actividad de ACP (2016).

**Emisiones directas del sector transporte carretero**

Una de las bases de datos disponibles recientemente (MINEM, 2016) corresponde a la geolocalización de la comercialización de combustible en estaciones de servicios. Esta base de datos se correlacionó con la venta por tipo de combustibles destinados al consumo privado en cada estación de servicio. Esto permitió mejorar la estimación por localidad de las ventas al sector transporte. Las ventas de combustible se asociaron en cada celda de la grilla.

$$Comb_{GRILLA}(x, y, k) = \sum_j Comb_{ESTACION}(j, x, y, k) \quad (5)$$

donde  $Comb_{GRILLA}$  es la suma del combustible  $k$  vendido en todas las estaciones de servicios ubicadas en la celda  $(x, y)$  ( $Comb_{ESTACION}$ ). Dado que no todo el combustible vendido en esa celda se consume allí mismo, se realizó una distribución del consumo de combustible en las celdas vecinas mediante una función de convolución con una función de filtro bigausiano  $bg(x, y)$ , normalizado para el centro del filtro ( $bg(x_m, y_m) = 1$ ) (Puliafito, 2015):

$$bg(x, y) = \exp\left[-\left(\frac{x-x_m}{\varepsilon}\right)^2\right] \times \exp\left[-\left(\frac{y-y_m}{\varepsilon}\right)^2\right] \quad (6)$$

La distribución de combustible ( $Comb_{CONV}$ ) es:

$$Comb_{CONV}(x, y, k) = \frac{1}{\sum_{u,v} bg(u, v)} \iint_{u=u_0, v=v_0}^{u=u_f, v=v_f} [Comb_{GRILLA}(u, v, k) \times bg(x - u, y - v)] dudv \quad (7)$$

donde  $u_{f,0} = x \pm x_m/2$ ;  $v_{f,0} = y \pm y_m/2$ ; el ancho del filtro es de 500 km con una desviación  $\varepsilon$  dependiente del tipo de combustible. A partir de esta información se estimaron la cantidad de vehículos-kilómetros transportados (VKT) en cada grilla, y la eficiencia  $\gamma$  de consumo por tipo de combustible  $k$ :

$$VKT_{GRILLA}(x, y, k) = Comb_{CONV}(x, y, k) \times \gamma(k) \quad (8)$$

Una vez determinado los VKT de cada celda de la grilla se calcularon las emisiones del sector transporte carretero  $E_{TRC}$  correspondientes a la celda  $(x,y)$  de la grilla, el combustible  $k$  y contaminante  $p$ :

$$E_{AVIA}(p) = \sum_{k,t} A_{AVIA}(k, t) \times F_{AVIA}(k, p) \quad (9)$$

donde  $F_{TRC}$  es un factor de emisión que depende del tipo de vehículo  $v$ , combustible  $k$  y contaminante  $p$  (Pulíafito, 2015).

### Emisiones del sector ferroviario, aeronáutico y de navegación fluvial y marítima

#### (A) Aviación

Las emisiones estimadas comprenden la porción de aviación civil y militar de las fuentes móviles de emisión de combustión, incluyendo el tráfico de aeropuertos nacionales e internacionales (ciclos de aterrizaje y despegue - LTO < 1 000 m) y tráfico de cruceros. Dado que las emisiones provienen del uso de combustible para aviones el punto de partida básico fue la estadística nacional de ventas de combustible subdividida en uso nacional e internacional (MINEM, 2016). El número total de LTO para vuelos domésticos e internacionales se obtuvo de ORSNA (2014). El cálculo sigue el enfoque de Nivel 1 en EMEP (2016) y está representado en la ecuación (10) y aplicado a nivel nacional.

$$E_{AVIA}(p) = \sum_{k,t} A_{AVIA}(k, t) \times F_{AVIA}(k, p) \quad (10)$$

donde  $E_{AVIA}(p)$  es la emisión anual del contaminante  $p$  para cada una de las fase de LTO y crucero,  $A_{AVIA}$  es el consumo de combustible en cada fase del vuelo, y  $F_{AVIA}$  es el factor de emisión referido la contaminante  $p$  y combustible  $k$ .

#### (B) Ferrocarril

La actividad ferroviaria de pasajeros en Argentina está centrada en Buenos Aires que comprende un servicio de pasajeros de larga distancia y trenes urbanos. Además, hay varios operadores privados de carga, junto con la estatal Trenes Argentinos Cargas y Logística. En 2014, la red transportó 8 893 millones de toneladas-kilómetro (toneladas  $\times$  distancia transportada: TKT). El enfoque utilizado en este inventario se basa

en el consumo de combustible, según la ecuación (1) usando los factores de emisión apropiados para la tecnología media de la flota de locomotoras. La Comisión Nacional del Transporte disponía de información sobre el reparto del consumo de combustible o entre distintos operadores y líneas. Con el fin de desagregar espacialmente las emisiones, se repartió el uso

de combustible proporcionalmente a las vías activas del ferrocarril. Se utilizó un sistema de jerarquía para corredores activos de ferrocarril para distinguir entre las líneas de operación completa y los senderos que se utilizan de forma intermitente.

#### (C) Navegación fluvial y marítima

Se consideran las emisiones procedentes de propulsión y motores auxiliares durante el atraque, maniobra en el puerto y etapa de cruce-ro desde embarcaciones oceánicas, portuarias y de navegación fluvial interior. La navegación interior argentina está centralizada en los ríos de la Plata, Paraná, Paraguay y Uruguay, siendo los puertos más importantes Buenos Aires, La Plata, Rosario, Santa Fe, Campana, San Nicolás, Goya, Reconquista, Barranqueras, Formosa, Gualeguaychú y Concepción del Uruguay. Las emisiones se calcularon siguiendo el enfoque general *top-down* a partir de consumo de combustibles (ver ecuación 1), usando los factores de emisión apropiados para la tecnología media de la flota de buques y embarcaciones. Se iden-

tificaron espacialmente los puertos y amarres en ríos y costas marítimas, y se asignaron rutas entre puertos y amarres utilizando herramientas de información geográfica e identificándola en las celdas de la grilla de base. Se utilizaron datos históricos sobre el movimiento de buques en cada puerto de la Secretaría de Puertos y Vías Navegables (SPVN, 2016). Las emisiones en fase crucero se asignaron espacialmente usando las rutas de las principales líneas navieras utilizando también los movimientos de los buques.

### Emisiones residenciales y comerciales

La información de viviendas disponibles en el INDEC (2016) permite discriminar el tipo principal de combustible usado para cocinar y calefacción: gas natural, GLP (en tubo, garrafa o zeppelin), leña o electricidad. La información de viviendas y población se encuentra desagregada en un mapa de radios y fracciones censales. La información sobre consumos mensuales está desagregada por departamento, por lo que fue posible redistribuir el consumo de cada celda de la grilla en forma proporcional a la cantidad de usuarios departamentales:

$$Rg(x, y, k) = \frac{Hg(x, y, k) * Rd(x, y, k)}{Hd(x, y, k)} \quad (11)$$

Siendo  $Rg$  el consumo del combustible  $k$  residencial considerado en la celda  $(x, y)$ ;  $Hg$  es la cantidad de viviendas en la misma celda que consumen el combustible  $k$ ;  $Hd$  es la cantidad total de viviendas del departamento  $d$ , y  $Rd$  es el consumo del combustible  $k$  del departamento  $d$ . Esta desagregación se realizó para cada tipo de combustible usado para cocinar. La información del uso de leña, carbón y otras formas de biomasa se realizó siguiendo un enfoque similar al propuesto en el proyecto FAO/WISDOM (Trossero, 2009) asumiendo una tasa de uso por vivienda para cocción y calefacción de 2,7 Tn (base seca) anuales por vivienda para aquellas viviendas que sólo usan biomasa, y de 0,25 Tn para el resto de las viviendas. Las emisiones por uso doméstico de combustible en cada celda se calculan como sigue:

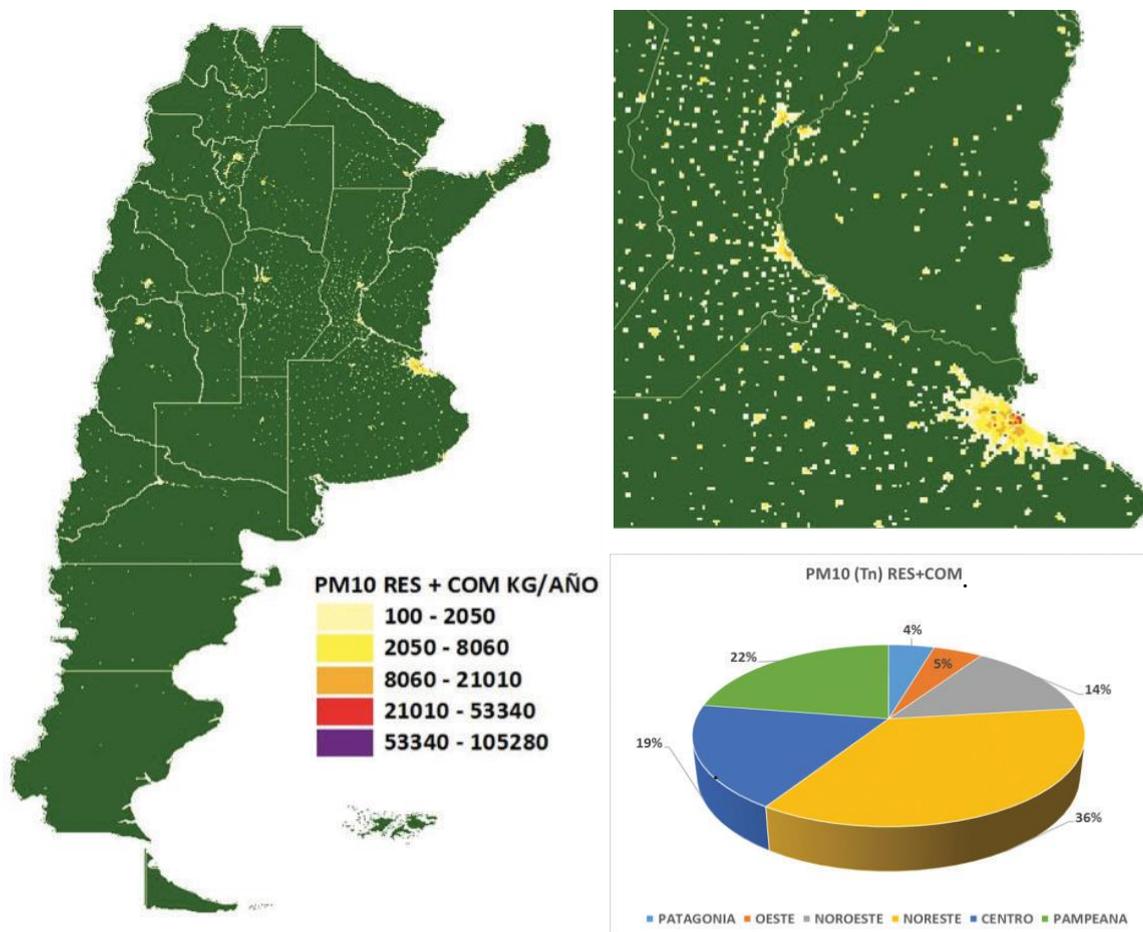
$$E_{RESID}(x, y, p) = \sum_k Rg(x, y, k) \times F_{COMB}(k, p) \quad (12)$$

donde  $E_{RESID}(x, y, p)$  son las emisiones del contaminante  $p$ , en la celda  $(x, y)$ ,  $Rg$  es el consumo de combustible  $k$ ; y  $F_{COMB}$  es el factor de emisión apropiado para cocinas y estufas a gas natural, gas licuado (GLP) o leña. Las emisiones del sector comercial y gubernamental se asociaron a las emisiones residenciales. Se estimó un consumo total de GLP de 256 kTep (234 mil Tn) y leña de 56 kTep (86 mil Tn) para los distritos sin gas natural y un consumo total de Diesel Oil + Gas Oil de 120 kTep (120 mil Tn) y Fuel Oil de 60 kTep (61 mil Tn) para todos los distritos distribuyendo el consumo estimado en el Balance Energético Nacional (BEN, 2014).

### 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./km<sup>2</sup>) ocupan el 0,68% del territorio con 22 300 000 habitantes, y las zonas densamente pobladas ( $> 7500$  hab./km<sup>2</sup>) se distribuyen en el 0,06% ( $< 190 000$  ha) del territorio con 13 200 000 habitantes (Figura 2). 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. Las emisiones comerciales incluyen las del sector gubernamental (Oficinas públicas, hospitales, escuelas, etcétera). Las emisiones a la atmósfera por el uso de electricidad se tienen en cuenta en la sección siguiente de emisiones de centrales térmicas.

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



**Fig. 2. 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; *Noreste*: 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).

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

Dens. Hab/Km <sup>2</sup>	CO <sub>2</sub>	NOX	CH <sub>4</sub>	CO	N <sub>2</sub> O	VOC	SO <sub>2</sub>	PM10	PM25
< 100	192 953	380	106	2 878	2	171	50	423	423
>= 100 < 1000	1 730 579	3 664	764	20 886	18	1 240	367	3 029	3 029
>= 1000 < 2500	3 502 961	8 151	930	25 738	29	1 521	440	3 575	3 575
>= 2500 < 5000	6 803 417	17 049	787	22 931	35	1 325	352	2 753	2 753
>=5000 < 7500	6 907 071	17 702	481	14 949	28	844	209	1 504	1 504
>=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
<b>TOTAL</b>	<b>30 892 910</b>	<b>77 246</b>	<b>3 774</b>	<b>109 909</b>	<b>163</b>	<b>6 365</b>	<b>1 745</b>	<b>13 393</b>	<b>13 393</b>

## 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.

La Figura 3 muestra las emisiones de CO<sub>2</sub> (Gg) producidas por refinadoras, 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).

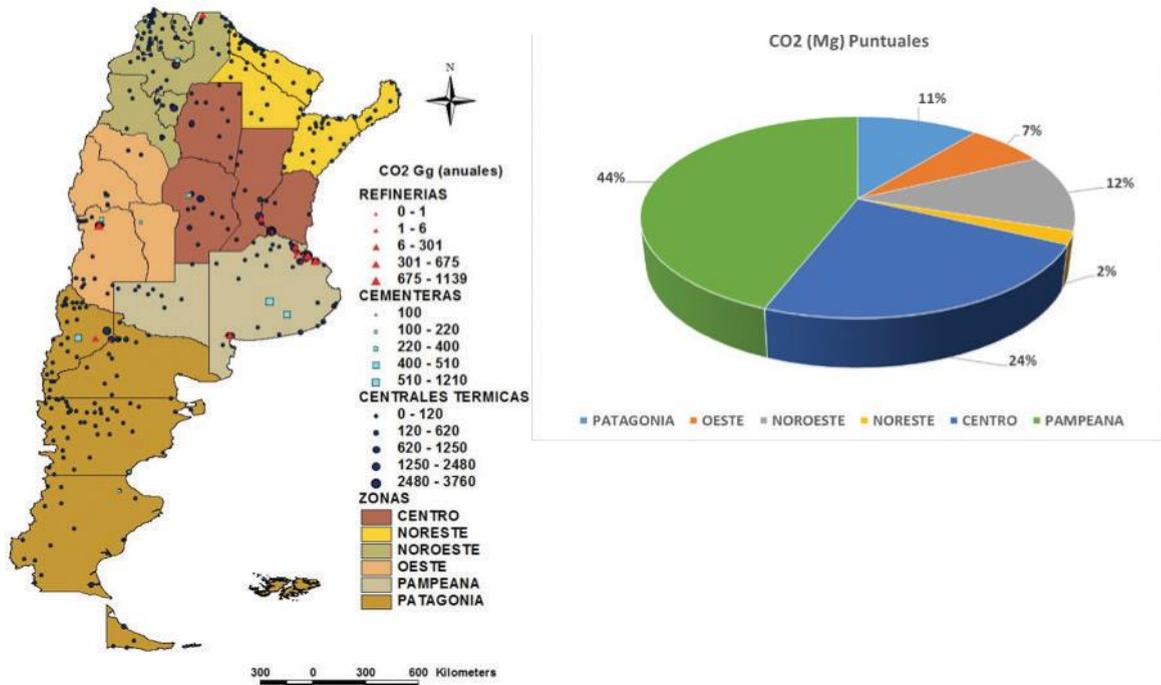
**Tabla 4. Producción anual en plantas de cemento, refinadoras y generación de electricidad**

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 provenientes de grandes fuentes puntuales (Mg/año)**

Sector	CO <sub>2</sub>	NOX	CH <sub>4</sub>	CO	N <sub>2</sub> O	VOC	SO <sub>2</sub>	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.



**Fig. 3. Distribución espacial de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Gg/año) centrales térmicas, cementera y refinadoras por producción de calor o electricidad**

## Emisiones del transporte

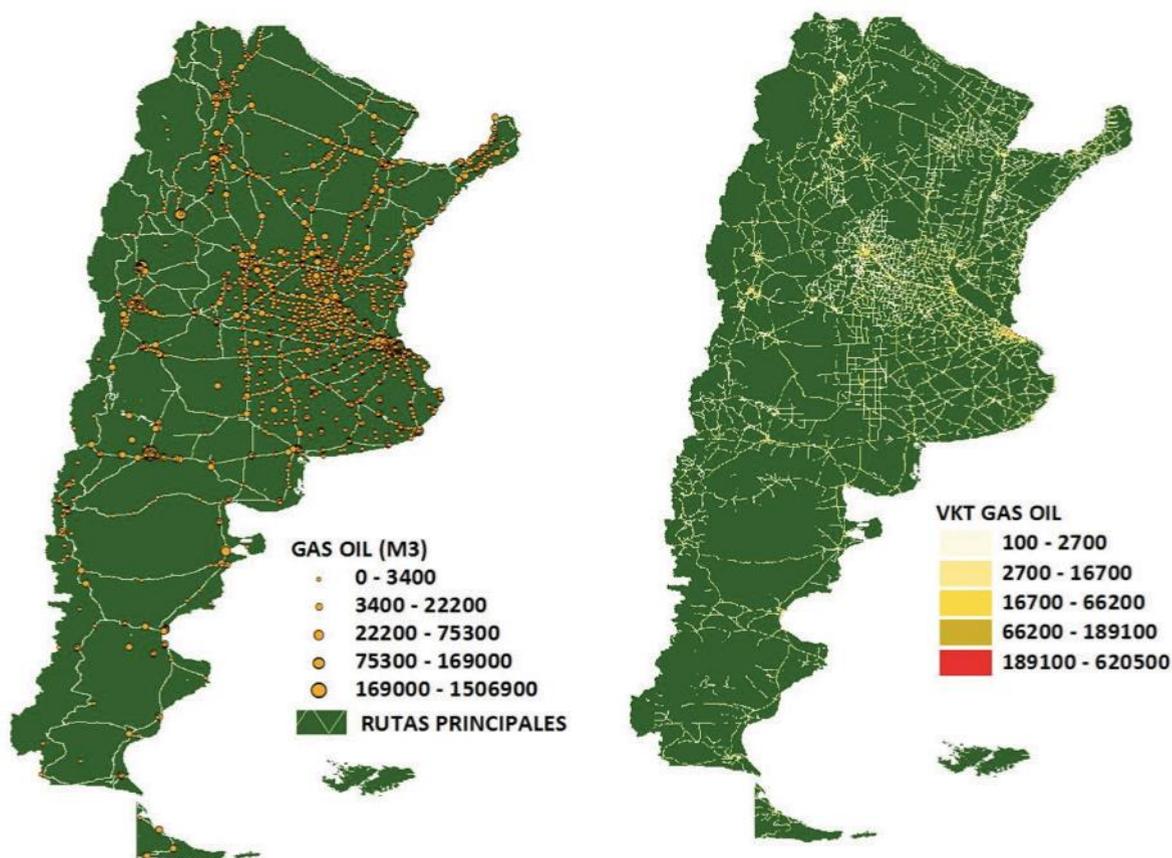
La Tabla 6 muestra las emisiones anuales provenientes del sector transporte tanto carretero, navegación fluvial, de ferrocarriles y aéreo.

La Figura 4 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 SO<sub>2</sub> 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.

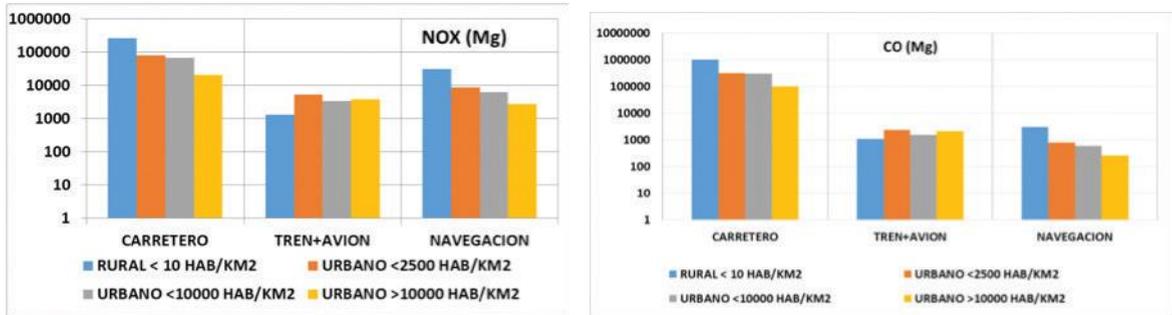
**Tabla 6. Emisiones anuales (Mg/año) provenientes del sector transporte**

Sector	CO <sub>2</sub>	NOX	CH <sub>4</sub>	CO	N <sub>2</sub> O	VOC	SO <sub>2</sub>	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



**Fig. 4. a. Consumo, actividad y emisiones del sector de transporte carretero**

Izquierda: Venta de gas oil en estaciones de servicio (m<sup>3</sup>/año); Derecha: actividad medida como VKT para transporte carretero de gas oil (veh-km/año).

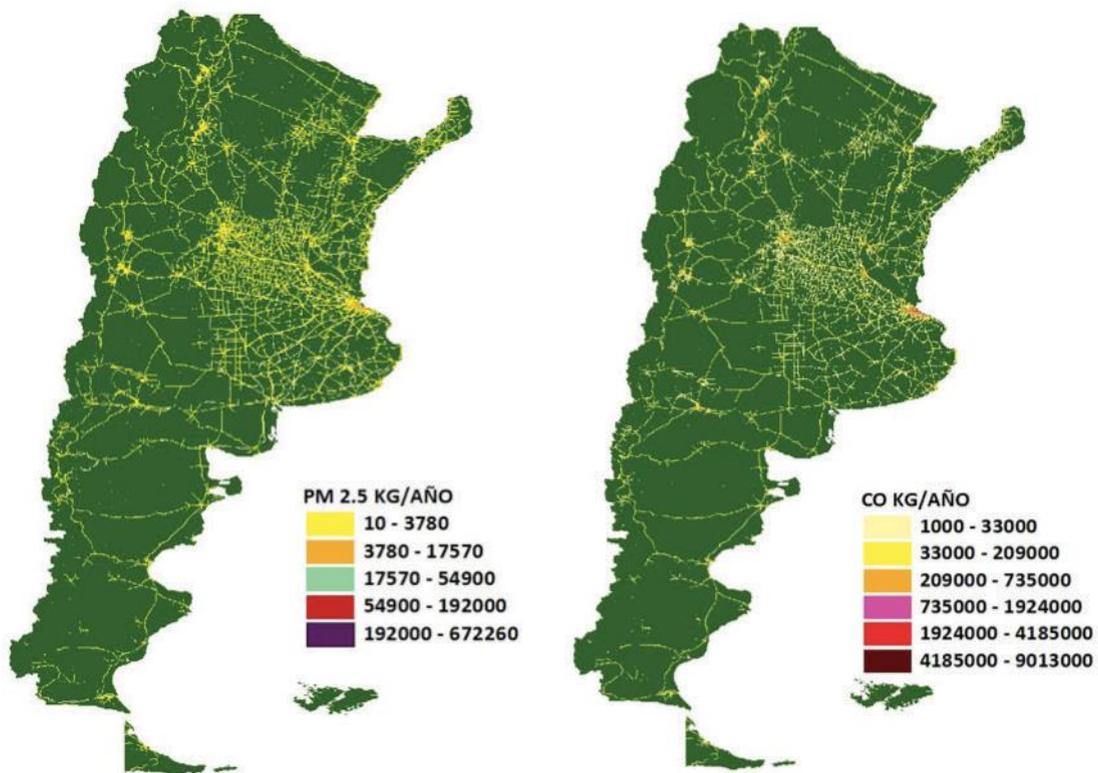


**Fig. 4. b. Consumo, actividad y emisiones del sector de transporte carretero**  
Izquierda: Emisiones de NOX del transporte carretero; Derecha: Emisiones de CO en función del tipo de urbanización.

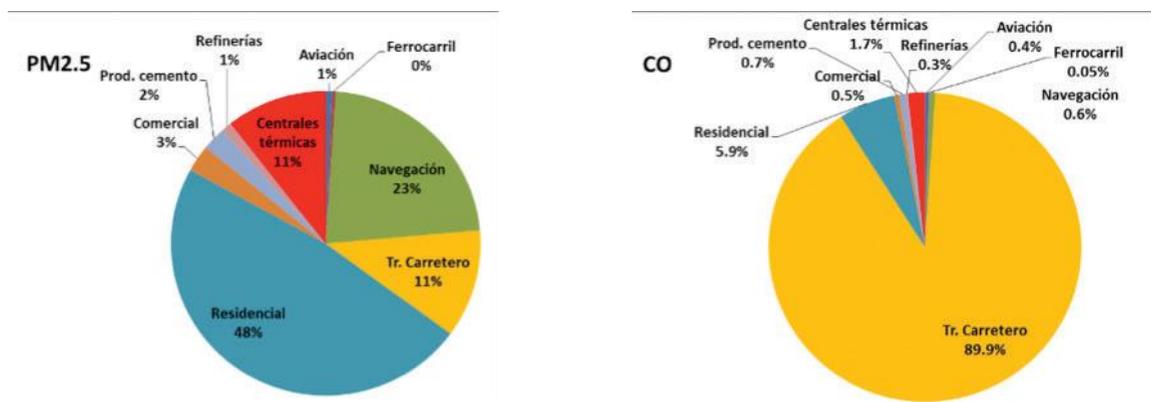
### Resultados generales

La Figura 5 muestra el total de emisiones incluidas en este inventario para dos contaminantes primario: PM<sub>2.5</sub> y monóxido de carbono. Puede apreciarse la distinta proporción atribuible a cada tipo de fuente. Mientras que el PM<sub>2.5</sub> 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, para 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. La Tabla 7 muestra los resultados totales por sectores y contaminantes calculados.



**Fig. 5. a. Inventario nacional de emisiones en toneladas por año por celda:**  
a) Material particulado fino PM 2.5 y b) Monóxido de carbono.



**Fig. 5. b. Inventario nacional de emisiones en toneladas por año por celda:** Proporciones emitidas de acuerdo al tipo de fuente considerada.

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

Sector	CO <sub>2</sub>	NOX	CH <sub>4</sub>	CO	N <sub>2</sub> O	VOC	SO <sub>2</sub>	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.

## Discusión y conclusiones

El principal objetivo de este trabajo ha sido mostrar el desarrollo metodológico usado en cada sector para confeccionar un inventario de emisiones atmosféricas grillado.

Esta metodología exige tres pasos, primero debe recopilarse información de diversas fuentes de acuerdo al sector considerado. Segundo debe distribuirse espacialmente la información recopilada, que implícitamente tiene asociada escalas espaciales muy diversas. Tercero se requiere la selección de los factores de emisión apropiados que dependerán de la tecnología, el combustible usado y el contaminante seleccio-

nado. Dado que no existen mediciones locales de estos factores de emisión se usaron factores internacionales adoptados comúnmente.

Sin duda, el principal aporte de este trabajo es la asignación geográfica de cada fuente. Así una fuente industrial o una estación de servicio puede fácilmente asociarse a un punto geográfico con coordenadas conocidas. El consumo de una fuente residencial se conoce, sin embargo, a nivel de provincia y/o departamento, de la misma forma que una fuente de transporte se asocia con una línea que puede ser del orden de los cientos de metros a cientos de kilómetros. A fin

de que estas fuentes distintas de escalas variables puedan usarse en un modelo de calidad del aire, se las reorganiza en una única base de dato en forma de grilla o damero. Conforme a la resolución de la información de base se selecciona el tamaño de la celda de la grilla (o resolución) el cual producirá que las fuentes originales de datos estén incluidas o no en una única celda. Para las fuentes cuya extensión son mayores que una celda (en este caso de 2,5 x 2,5 km) se seleccionó una variable aproximada conocida a nivel de celda que pudiera usarse para distribuir espacialmente esa variable (usando la ecuación (2)). Un ejemplo de esto lo vimos en las fuentes residenciales, donde el consumo (de gas natural) de la celda (dato a calcular) se obtuvo usando el consumo departamental (de gas natural) pero distribuido usando la cantidad de viviendas en cada celda (dato conocido), asumiendo que todas las celdas de ese departamento tenían un consumo anual similar. Si la fuente, en cambio, fuese menor que la celda (por ejemplo radios censales en zonas urbanas), se sumaron todas las fuentes contenidas en esa celda.

Algunas conclusiones de este trabajo son:

a) Respecto de las emisiones residenciales el 18% se generan en las zonas rurales ( $< 2\ 500$  hab/km<sup>2</sup>), 44% se generan en las zonas urbanas de densidad media ( $\geq 2\ 500 < 7\ 500$  hab/km<sup>2</sup>) que corresponden a zonas del tipo residencial, el 38% restante se emiten en ciudades medias y densamente pobladas ( $> 7\ 500$  hab/km<sup>2</sup>).

b) 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).

c) En el transporte la zona pampeana y central concentra el 60% de la actividad y las emisiones.

d) Del total de 140 Tg de emisiones de CO<sub>2</sub>, el 42% proviene del transporte, 36% de las fuentes puntuales consideradas y 22% del sector residencial y comercial.

e) De un total de 786 Gg de emisiones de NO<sub>x</sub> el 70% es producido por el transporte seguido del 21% de las fuentes puntuales.

f) 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.

## Agradecimientos

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.

## Referencias

- AFCP: Asociación de Fabricantes de Cemento Portland [www.afcp.org.ar](http://www.afcp.org.ar). Último acceso 2/11/2017.
- ANDRADE, M. F.; YNOUE, R.; DIAS FREITAS, E.; TODESCO, E.; VARA VELA, A.; IBARRA, S.; DROPRINCHINSKI, L.; MARTINS, J. y SILVEIRA BARRETO CARVALHO, V. "Air quality forecasting system for Southeastern Brazil". *Frontiers in Environmental Science*, 3, 9, (2015). doi: 10.3389/fenvs.2015.00009
- BEN: Balance Energético Nacional 2014 <http://datos.minem.gob.ar/> Último acceso 2/11/2017.
- BINKOWSKI, F. y SHAWN R., (2003). "Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model aerosol component 1. Model description". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108 (D6), DOI: 10.1029/2001JD001409
- CIMORELLI, A.; PERRY, S.; VENKATRAM, A.; WEIL, J.; PAINE, R. y PETERS, W., (1998). AERMOD-Description of model formulation. Environmental Protection Agency [www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod\\_mfd.pdf](http://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf). Último acceso 2/11/2017.
- CRIPPA, M.; JANSSENS-MAENHOUT, G.; DENTENER, F.; GUIZZARDI, D.; SINDELAROVA, K.; MUNTEAN, M.; VAN DINGENEN, R. y GRANIER, C., (2016). "Forty years of improvements in European air quality: regional policy-industry interactions with global impacts". *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(6), 3825–3841, <https://doi.org/10.5194/acp-16-3825-2016>
- EDGAR. (2016). Emissions Database for Global Atmospheric Research. European Commission - JRC Joint Research Centre IES Institute for Environment and Sustainability. Italy. <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/> Último acceso 2/11/2017.
- EMEP (2016). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 Technical guidance to prepare national emission inventories. Copenhagen, Denmark. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016/#parent-fieldname-title>. Último acceso 2/11/2017.
- GALLARDO, L.; ESCRIBANO, J.; DAWIDOWSKI, L.; ROJAS, N.; ANDRADE, M. y OSSES, M., (2012). "Evaluation of vehicle emission inventories for carbon monoxide and nitrogen oxides for Bogotá, Buenos Aires, Santiago, and São Paulo". *Atmospheric Environment*, 47, 12–19, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.051>
- GRELL, G.; PECKHAM, S.; SCHMITZ, R.; MCKEEN, S.; FROST, G.; SKAMAROCK, W. y EDER, B., (2005). "Fully coupled "online" chemistry within the WRF model" *Atmospheric Environment*, 39 (37), 6957–6975, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.027>
- INDEC Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. Argentina: Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2016. [www.indec.gov.ar](http://www.indec.gov.ar) . Último acceso 2/11/2017.
- IPA. (2017). Anuario de la Industria Petroquímica de Argentina, 2015. [www.ipa.gov.ar](http://www.ipa.gov.ar). Último acceso 2/11/2017.
- IPCC 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (Ed.). Hayama Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES). <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Último acceso 2/11/2017.
- LONGO, K.; FREITAS, S.; PIRRE, M.; MARÉCAL, V.; RODRIGUES, L.; PANETTA, J. y ALONSO, M., (2013). "The chemistry CATT--BRAMS model (CCATT--BRAMS 4.5): a regional atmospheric model system for integrated air quality and weather forecasting and research". *Model Dev. Discuss*, 6, 1173–1222, <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1389-2013>
- EPA: Manual AP-42 US-EPA, 2016. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emission-factors>. Último acceso 2/11/2017.
- ALONSO, M.; LONGO, K.; FREITAS, S.; DA FONSECA, R.; MARÉCAL, V.; PIRRE, M. y GALLARDO KLENNER, L. "An urban emissions inventory for South America and its application in numerical modeling of atmospheric chemical composition at local and regional scales" *Atmospheric Environment*, 44(39), 5072–5083, (2010). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.013>
- MINEM: Ministerio De Energía De Argentina Y Minería 2016 <http://datos.minem.gob.ar/> Último acceso 2/11/2017.
- ORSNA, (2014): Organización Nacional Reguladora del Sistema Aeroportuario. <https://www.orsna.gov.ar/>. Último acceso 2/11/2017.

PULIAFITO, E.; ALLENDE, D.; PINTO, S. and CASTESANA, P. "High resolution inventory of GHG emissions of the road transport sector in Argentina". *Atmospheric Environment*, 101, 303–311, (2015). . <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.040>

SCIRE, J.; STRIMAITIS, D. y YAMARTINO, R., (2000). A user's guide for the CALPUFF dispersion model. Massachusetts, USA: Earth Tech, Inc. Concord., [http://www.src.com/calpuff/download/CALPUFF\\_UsersGuide.pdf](http://www.src.com/calpuff/download/CALPUFF_UsersGuide.pdf) . Último acceso 2/11/2017.

SPYVN: Secretaría de Puertos y Vías Navegables (2016), <http://www.sspyvn.gob.ar/sspyvn> Último acceso 2/11/2017.

TCNA: Tercera Comunicación Nacional De La República Argentina A La Convención Marco De La Naciones Unidas Para El Cambio Climático (2015). [www.ambiente.gob.ar/tercera-comunicacion-nacional/](http://www.ambiente.gob.ar/tercera-comunicacion-nacional/) Último acceso 2/11/2017.

TROSSERO, M.; DRIGO, R.; ANSCHAU, A.; CARBALLO, S. and FLORES MARCO, N., (2009) Análisis del balance de energía derivada de biomasa en Argentina. <http://www.fao.org/docrep/011/i0900s/i0900s00.htm>. Último acceso 2/11/2017.