

## UN INVENTARIO DE QUEMA DE BIOMASA EN ALTA RESOLUCIÓN PARA EL NORTE Y CENTRO DE ARGENTINA

Köhnken, Dirk<sup>1</sup>, Allende, David G.<sup>1\*</sup>, Ruggeri María F.<sup>1,2</sup>, Pascual Flores, Romina M.<sup>1,3</sup>, Bolaño Ortiz, Tomás<sup>1,2</sup>, Puliafito Salvador E.<sup>1,2</sup> y Lakkis Susan G.<sup>4,5</sup>

1: Grupo de Estudios de la Atmósfera y el Ambiente  
Facultad Regional Mendoza  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rodríguez 273, Mendoza-Argentina (M5502AJE)  
e-mail: david.allende@frm.utn.edu.ar, <http://www.frm.utn.edu.ar/geaa>

2: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

3: Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica

4: Facultad de Ciencias Agrarias, Pontificia Universidad Católica Argentina (UCA), Cap. Gral. Ramón Freire 183, (C1426AVC), Buenos Aires, Argentina.

5: Unidad de Investigación y Desarrollo de las Ingenierías (UIDI), Facultad Regional Buenos Aires (FRBA), Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Argentina

**Resumen.** *Las emisiones por quema de biomasa a partir de incendios forestales, quema de residuos agrícolas y cambios de uso de suelo contienen grandes cantidades de gases y partículas, que impactan en calidad de aire local y regional, con efectos sobre la salud, los ecosistemas, la química atmosférica global y el clima. Este estudio tiene por objeto la realización de un inventario de emisiones por quema de biomasa en resolución de 10 km para el Centro y Norte de Argentina durante los años 2013-2014. En tal sentido se combinaron imágenes de MODIS abordo de los satélites Terra y Aqua y de NOAA-AVHRR, junto con datos satelitales de densidad de biomasa y de variaciones espaciotemporales de factores de combustión. El proceso de detección de fuegos combina un algoritmo contextual con un umbral de temperatura adaptativo y máscaras de agua permanente, luces estables y cobertura de nubes para evitar detecciones falsas. Los factores de emisión utilizados se asociaron a las distintas coberturas vegetales obtenidas de los mapas de LUCL de GLOBCOVER. Las mayores contribuciones por sobre todos los tipos de LULC se deben a quema de bosques de hoja caducifolia (38%), zona cultivada (22%), bosques perennes (11%) y zona mixta cultivada, vegetación natural (6%). Las emisiones por quema presentan variaciones interanuales muy marcadas con picos de frecuencia entre los meses de agosto y diciembre.*

**Palabras clave:** *quema de biomasa, MODIS, aerosoles, gases de efecto invernadero, AVHRR.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La quema de biomasa es una fuente importante de contaminantes atmosféricos y posee efectos significativos en la química regional y el cambio climático [1–4]. Los gases traza activos y partículas liberados en la quema de biomasa pueden actuar como precursores de ozono troposférico y aerosoles orgánicos secundarios, los que a su vez provocan efectos negativos en la calidad de aire local y regional, resultando en una amenaza a la salud humana y al ambiente general [5], [6].

Las distribuciones espaciales y temporales de las emisiones provenientes de la quema de biomasa son, a su vez, entradas fundamentales a los Modelos de Transporte Químico. En ese sentido, varios estudios sugieren que la quema de biomasa es uno de los mayores contribuyentes a la incertidumbre en el pronóstico de calidad de aire [7]. Por lo tanto, la estimación de las emisiones relacionadas con este tipo de actividades debe ser cuantificada con la mayor precisión posible.

En todo el mundo se han realizado esfuerzos considerables, particularmente en países desarrollados para obtener y mejorar inventarios de emisiones de quema de biomasa, desde los años 70, utilizando principalmente información de sensado remoto, de manera de identificar el comportamiento del fuego y mejorar la precisión en la estimación total de las emisiones [8–11].

Entre agosto y octubre el trópico y sub-trópico de Sudamérica comienza la temporada de quema de biomasa para despejar campos y abrir nuevas áreas para el cultivo. En el norte de Argentina, Bolivia, Paraguay y la región del Mato Grosso en Brasil, las quemas se producen entre julio y noviembre, con máximos en agosto [12]. Aunque algunas de estas quemas pueden ser de pastizales, matorrales o residuos agrícolas, una gran parte es realizada para desmonte o deforestación.

Particularmente en el norte argentino, existen fragmentos de distintos tipos de bosque nativo, como Selva Misionera, Selva Tucumano Boliviana o Yungas, Parque Chaqueño, Monte, Espinal y Delta e Islas del Río Paraná, sometidos regularmente a desmonte. Por otro lado, la quema del cañaveral y/o su rastrojo está ampliamente difundida en Argentina, al igual que en otros países productores de caña de azúcar.

En años recientes, varios estudios se han conducido con el objeto de estimar las emisiones por quema en Sudamérica y en especial, en el norte argentino, incluyendo mediciones de factores de emisión para residuos, o cultivo especiales, como la caña de azúcar, con el objetivo final de desarrollar inventarios de emisiones nacionales, regionales o locales [13–16]. Sin embargo, estos inventarios no suelen ser apropiados para su utilización en modelos regionales de calidad de aire debido a su baja resolución temporal y espacial.

Los objetivos de este trabajo son: a) analizar la variabilidad de las emisiones por quema de biomasa en el norte argentino; b) establecer un inventario de emisiones de alta resolución espacial para los contaminantes  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ , EC, OC, NMVOC, CO,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ ; c) identificar las características temporales y espaciales y d) cuantificar las incertidumbres en las estimaciones de las emisiones.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

El dominio de estudio se definió con el objeto de incluir el centro y norte de Argentina, entre los 20°S y los 40°S de latitud, abarcando también el sur de Bolivia, Brasil, Paraguay, Uruguay y el centro norte de Chile. El área está dividida en celdas de 10 x 10 km<sup>2</sup>, abarcando diversos tipos de biomas y de vegetación (Figura 1).

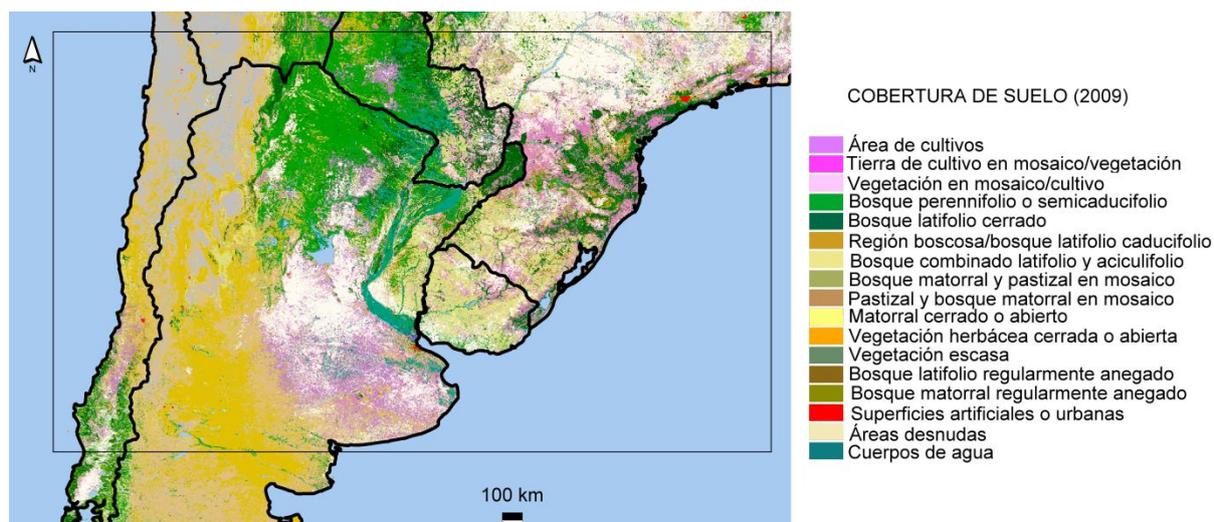


Figura 1. Área de estudio y tipo de cobertura del suelo para el inventario de emisiones.

### 2.2. Mapeo de fuegos activos: datos y algoritmo de detección

Para la detección de fuegos se combinan imágenes del sensor MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) abordo de los satélites Terra y Aqua y del Advanced Very High Resolution Radiometer de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA-AVHRR).

#### 2.2.1. AVHRR

Varios algoritmos para el procesamiento de datos del satélite AVHRR han sido utilizados con éxito para la detección de fuegos, desde procesamiento de un canal o hasta aplicaciones multicanales [17]. Asimismo, con el objeto de garantizar la eficiencia y confiabilidad, se han propuesto incluso mejoras que tengan en cuenta las variaciones estacionales y diversidad de ecosistemas y garanticen la consistencia de los resultados.

En tal sentido, un algoritmo contextual toma la decisión sobre si un pixel contiene fuego comparando los valores del pixel con los de su entorno, de manera que si el contraste es muy grande, el pixel es identificado como fuego. La ventaja de este algoritmo es que es adaptativo respecto al entorno, porque la decisión se toma en una base relativa y es aplicable a diferentes condiciones.

El proceso de detección de fuegos utilizado en este trabajo emplea una aproximación que combina la información espectral proveniente de las medición de las temperaturas de brillo entre las bandas 3 y 4 del AVHRR 18 y 19, la aplicación de umbrales adaptativos y un algoritmo contextual que investiga los fuegos potenciales en relación los pixeles vecinos [18]. La esencia de la detección de fuegos con AVHRR yace en el aumento de la radiancia emitida en la región del infrarrojo cercano (banda 3) para temperaturas típicas de fuego, de acuerdo a la función de Planck. Si bien la alta sensibilidad a la presencia de fuego de la banda infrarroja la hace ideal por su uso en la detección, es también posible que pequeños fuegos produzcan la saturación de este canal, por lo que se utiliza también la banda 4 en combinación. Por ejemplo, en un suelo de fondo a 300 K, un objeto caliente a 1000 K que ocupa solamente 0.02% del área del píxel, puede elevar la temperatura de brillo a 3.75  $\mu\text{m}$  hasta 324K.

El algoritmo consiste en dos etapas: la primera selecciona píxeles candidatos como potenciales fuegos y la segunda confirma o rechaza los mismos, producto de su comparación con el entorno (ver Figura 2).

En consecuencia, primeramente se seleccionan píxeles potenciales de forma relativamente gruesa, utilizando un umbral. En tal sentido, el valor de umbral sugerido por Flasse y Ceccato de 311K [18] es útil para el procesamiento de imágenes diurnas, pero para observaciones nocturnas se considera más conveniente el de 298 K, de manera de poder detectar fuegos nocturnos menos intensos. Asimismo, el error de omisión de fuegos menos intensos de baja temperatura es menor que durante el día. Por otro lado, la confianza de los fuegos detectados es mayor debido al menor impacto por reflejos de suelos secos y/o cálidos.

Debido a que el ancho de banda del canal 3 de AVHRR cubre tanto parte del rango solar como del térmico del espectro electromagnético, es relevante rechazar aquellos pixeles del canal 3 con valores altos debido a reflexión en lugar a alta temperatura. Entonces, para el procesamiento de imágenes diurnas, se aplicó un rango adaptativo para la banda 2 con el objeto de excluir nubes reflectivas altas y cuerpos de agua que, en algunos casos pueden ser confundidos con fuego.

Finalmente la confirmación de los fuegos potenciales en las observaciones diurnas, se realiza aplicando en primer lugar una ventana creciente alrededor del “píxel de fuego” (elemento de fuego que se quema activamente), comenzando con un tamaño de 3 x 3 pixeles, creciendo hasta un tamaño de 15 x 15, siempre que el 25% de todos los pixeles califiquen como pixeles válidos. Esto se hace para obtener un entorno válido, referido a información útil sobre tierra, sin contaminación de nubes ni fuego de background.

Para cada ventana de un entorno válido, se realiza el cálculo, utilizando la temperatura de brillo (BT) de las bandas 3 y 4 de NOAA-AVHRR. En tal sentido, un píxel es catalogado como un fuego potencial si se confirma:

$$BT_3 - BT_4 > \max\{\text{promedio}_{\text{entorno}}(BT_3 - BT_4) + 2\sigma_{\text{entorno}}(BT_3 - BT_4)\} \quad (1)$$

$$BT_3 > \text{promedio}_{\text{entorno}}(BT_3) + 2\sigma_{\text{entorno}}(BT_3) + 3K \quad (2)$$

Además de los valores umbrales y el algoritmo contextual, se utilizan máscaras para cuerpos de agua permanente y luces estables para cada escena. Esto reduce el tiempo de

procesamiento y las detecciones falsas por “hot-spots antropogénicos”. Para ello, se utilizó el mapa de uso y cobertura de suelo GLOBCOVER 2009 [19], que cuenta con 24 categorías diferentes, modificado con datos de luces nocturnas permanentes Operational Linescan System of the Defense Meteorological Satellite Program (DMSP - OLS), asociado normalmente con la ocupación urbana [20].

### 2.2.2. MODIS

Para este estudio se utilizó el también el producto MOD14 (Thermal Anomalies - Fires and Biomass Burning), que incluye la posición absoluta de la ocurrencia de fuego (día y noche), el criterio lógico utilizado para la selección de fuego y una estimación de la energía liberada. Se trata de un producto de nivel 2, procesado diariamente con una resolución espacial de 1 km [21]. MOD14 está bien documentado y evaluado. En general garantiza comparabilidad, reproducibilidad y está reconocido internacionalmente. Brevemente, el algoritmo funciona de la siguiente manera: se excluyen, primeramente datos inválidos como nubes, cuerpos de agua del análisis. Luego la detección se realiza a través de una serie de umbrales absolutos y pruebas contextuales. Este producto utiliza las bandas 21 o 22 (3.93-3.99  $\mu\text{m}$ ; BT 21/22) y la banda 31 (10.78-11.28  $\mu\text{m}$ , BT31).

Finalmente, fuegos contiguos encontrados por ambos métodos son agrupados definidos como un solo foco, utilizando las coordenadas geográficas y un radio de 1 km, tal como se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 2.

### 2.3. Estimación de emisiones

En este estudio, las emisiones por quema se estimaron utilizando el preprocesador de emisiones “prep\_chem\_sources” de WRF/Chem, el cual genera emisiones de gases y aerosoles destinado a modelos de transporte químico regional y global. En el caso de las emisiones por quema de biomasa, se utiliza el modelo Brazilian Biomass Burning Emission (3BEM) que emplea las localizaciones de los focos de fuego para alimentar modelos de calidad de aire. 3BEM utiliza asimismo algoritmos de filtros para minimizar el efecto de los fuegos no detectados por el sensado remoto. Los mapas obtenidos por sensado remoto son combinados con mapas de uso y cobertura de suelo, que asocian los fuegos con parámetros específicos, para finalmente, estimar la emisión total por medio de:

$$ET_i = \alpha_{veg} \cdot \beta_{veg} \cdot F_{i,veg} \cdot A_{fuego}$$

Donde  $ET_i$  es la emisión total en masa del contaminante  $i$  (kg),  $\alpha_{veg}$  es la fracción disponible de biomasa sobre el suelo ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $\beta_{veg}$  es el factor de combustión (fracción de biomasa que realmente se quema),  $F_{i,veg}$  es el factor de emisión para cada especie y tipo de vegetación y  $A_{fuego}$  es el área quemada.

Los píxeles de fuego detectados por MODIS y AVHRR representan una localización aproximada de la ubicación de fuego, pero no incluyen ningún tipo de información respecto al tamaño, por lo que se utiliza un área quemada de  $0.2 \text{ km}^2$  [14].

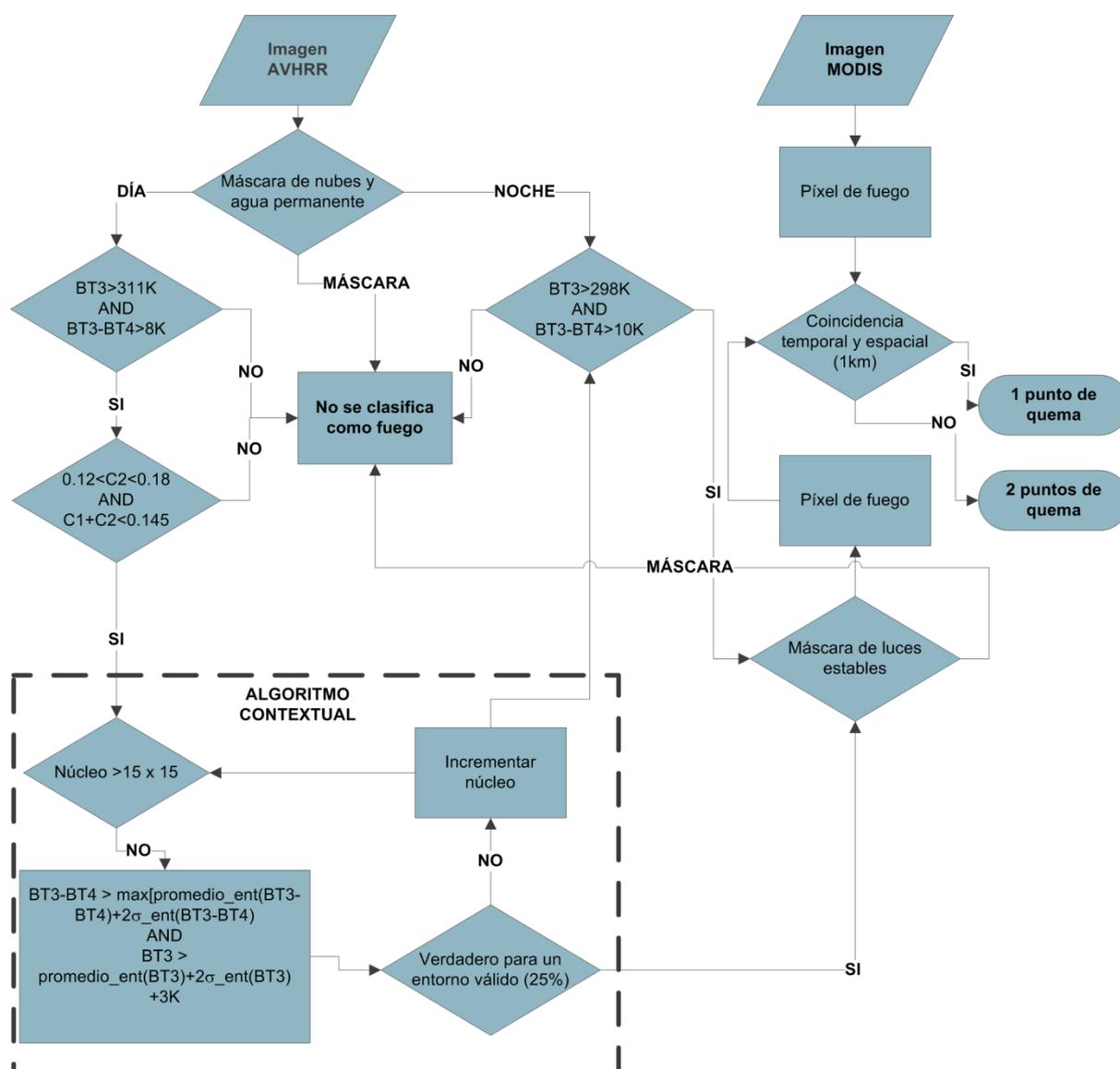


Figura 2. Esquema de procesamiento de datos de MODIS y AVHRR para la detección de fuegos.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Emisiones de gases y partículas en el norte y centro de Argentina

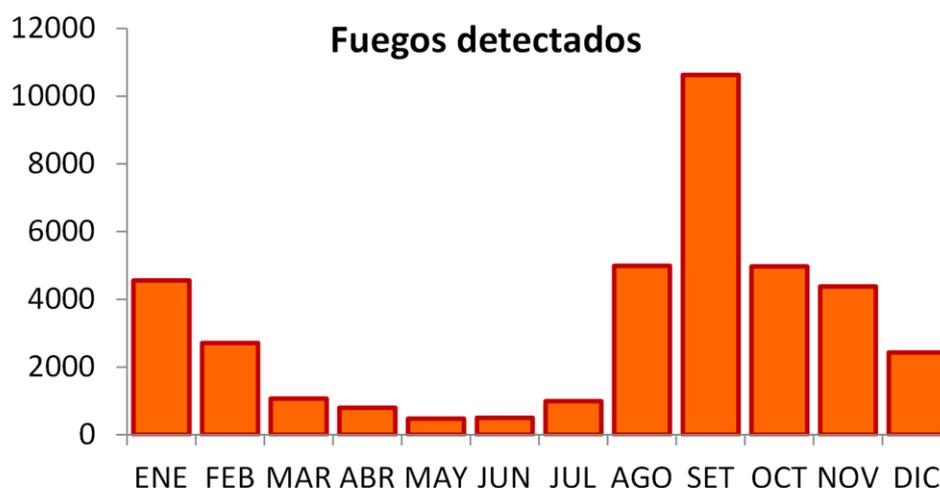
Las emisiones producidas por las fuentes relacionadas a la quema de biomasa en el norte y centro de Argentina se estimaron para el período comprendido entre julio del año 2013 y julio de 2014. La Tabla 1 resume las estimaciones para gases de efecto invernadero,

algunos contaminantes criterio y partículas durante el período de estudio.

Especie	Emisiones
CO <sub>2</sub>	45390.7
CH <sub>4</sub>	174.7
N <sub>2</sub> O	5.7
CO	3028.9
NO <sub>x</sub>	53.6
NH <sub>3</sub>	34.5
SO <sub>2</sub>	12.5
BC	15.0
OC	114.1
PM <sub>2.5</sub>	242.6

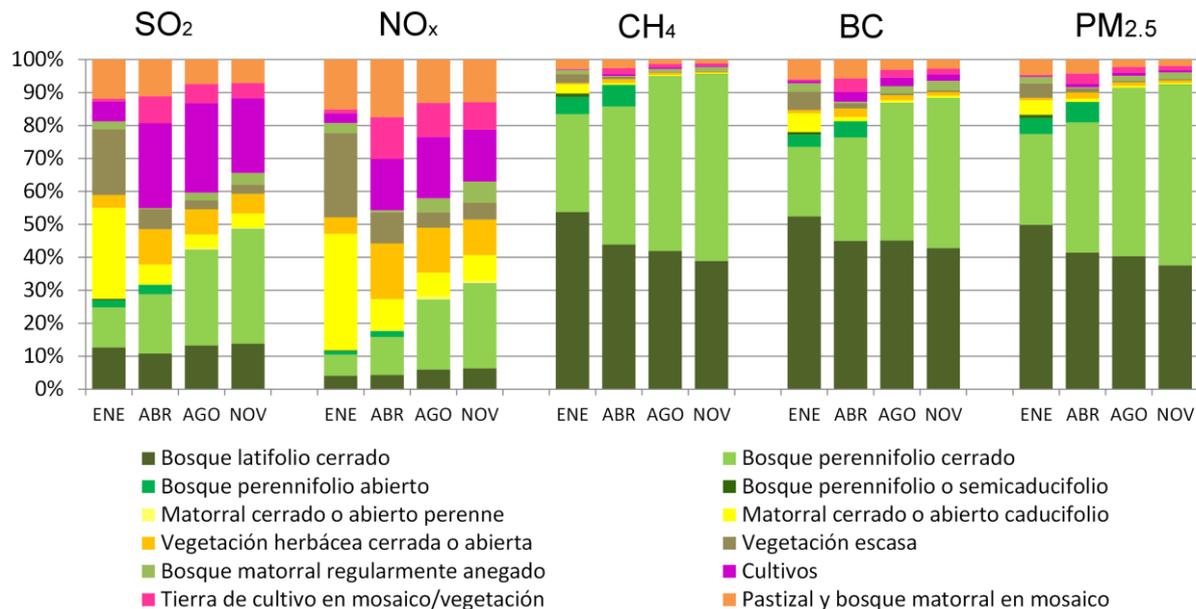
**Tabla 1.** Emisiones generadas por quema de biomasa en el centro y norte de Argentina entre julio de 2013 y julio de 2014 (unidades: miles de toneladas/año).

Se detectaron variaciones estacionales típicas en las emisiones por quema de biomasa de forma consistente con estudios previos, aunque las emisiones dependen tanto de actividades humanas como factores climáticos. La Figura 3 muestra que entre los meses de julio y noviembre se produce el mayor número de quemas en el área de estudio. Asimismo, durante el mes de enero puede notarse un gran número de fuegos, mayormente a latitudes medias (> 35°S).



**Figura 3.** Variación mensual de los fuegos detectados en el área de estudio.

La Figura 4 muestra la contribución por tipo de cobertura vegetal quemada para algunos meses característicos y contaminantes típicos.



**Figura 4.** Contribución a las emisiones de diferentes gases y partículas por categoría de cobertura de suelo, para distintas épocas del año (meses de enero, abril, agosto y noviembre).

Respecto a las emisiones de gases, por ejemplo, cerca del 20% es debida a la quema de bosque perenne, 20% por la quema de matorrales o vegetación herbácea, alrededor de 15% debido a mosaicos bosques, matorrales y pastizales, y un 10% a la quema en zonas cultivadas. En cambio, para las emisiones de partículas, cerca del 90% de las emisiones se producen por la quema de bosques (latifolio o perennifolio).

Existen claras variaciones estacionales, por ejemplo la quema en zonas cultivadas es más relevante desde julio a octubre, mientras que la quema en bosques presenta dos picos, entre enero y febrero y de agosto a octubre. Esto mismo es también característico para los focos detectados en zonas con predominancia de vegetación herbácea o matorrales.

### 3.2. Características espaciales

El inventario de emisiones por quema de biomasa se desagregó espacialmente en grillas de 10 x 10 km<sup>2</sup> usando la ubicación de los puntos de quema. Las Figura 5 y Figura 6 muestran esta distribución para todo el periodo analizado para NO<sub>x</sub> y para PM<sub>2.5</sub> respectivamente. Asimismo, la Figura 7 muestra claramente la variación de los puntos de quema por latitud, siendo evidente la mayor prevalencia de puntos de quema a latitudes menores a 28°S. Otros gases y partículas poseen una distribución similar. En forma general, las emisiones por quema de biomasa están distribuidas sobre áreas cubiertas de bosques perennes o semicaducifolios y bosques latifolios, y en menor medida, sobre áreas de pastizales o matorrales.

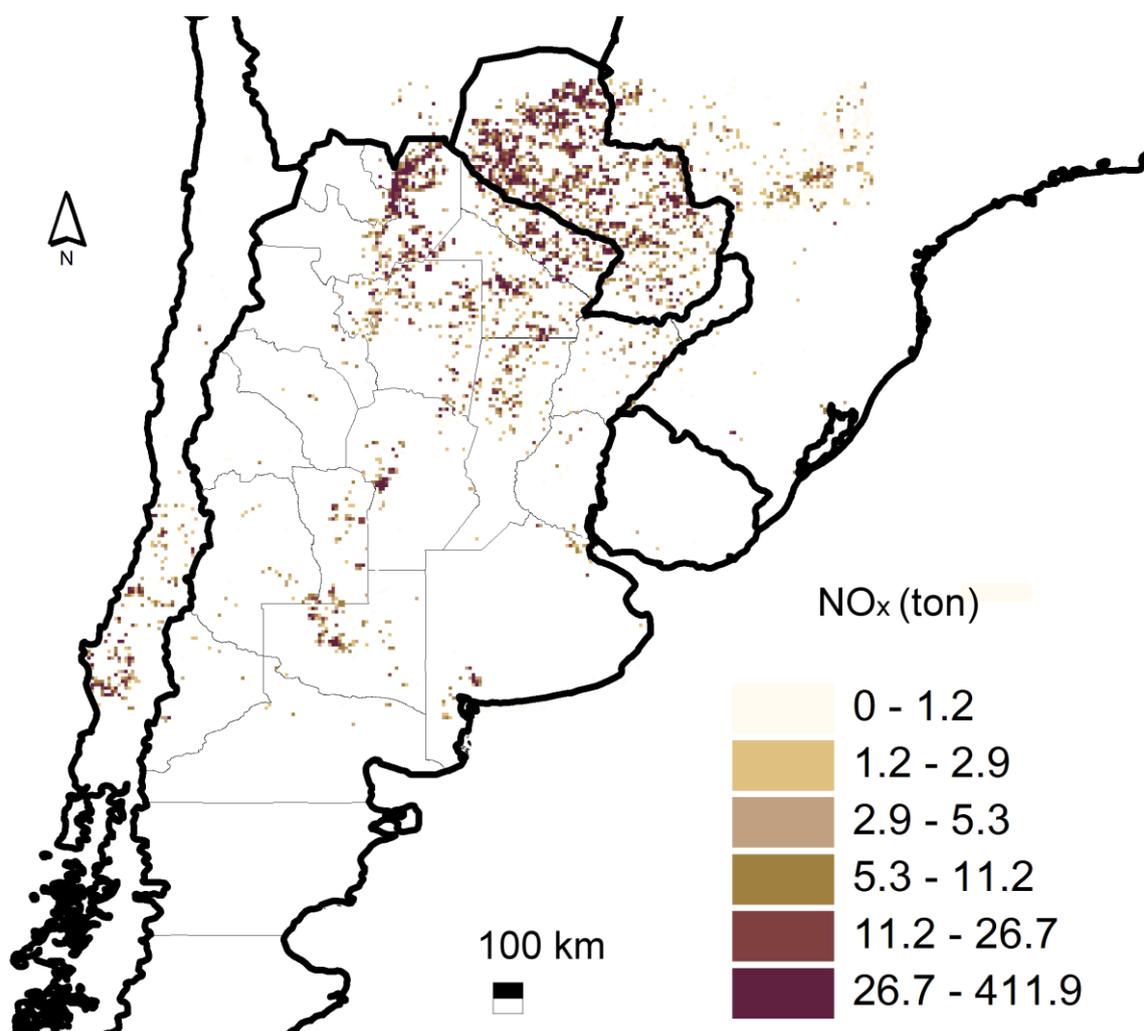


Figura 5. Distribución espacial de las emisiones de NOx por quema de biomasa para el período en estudio.

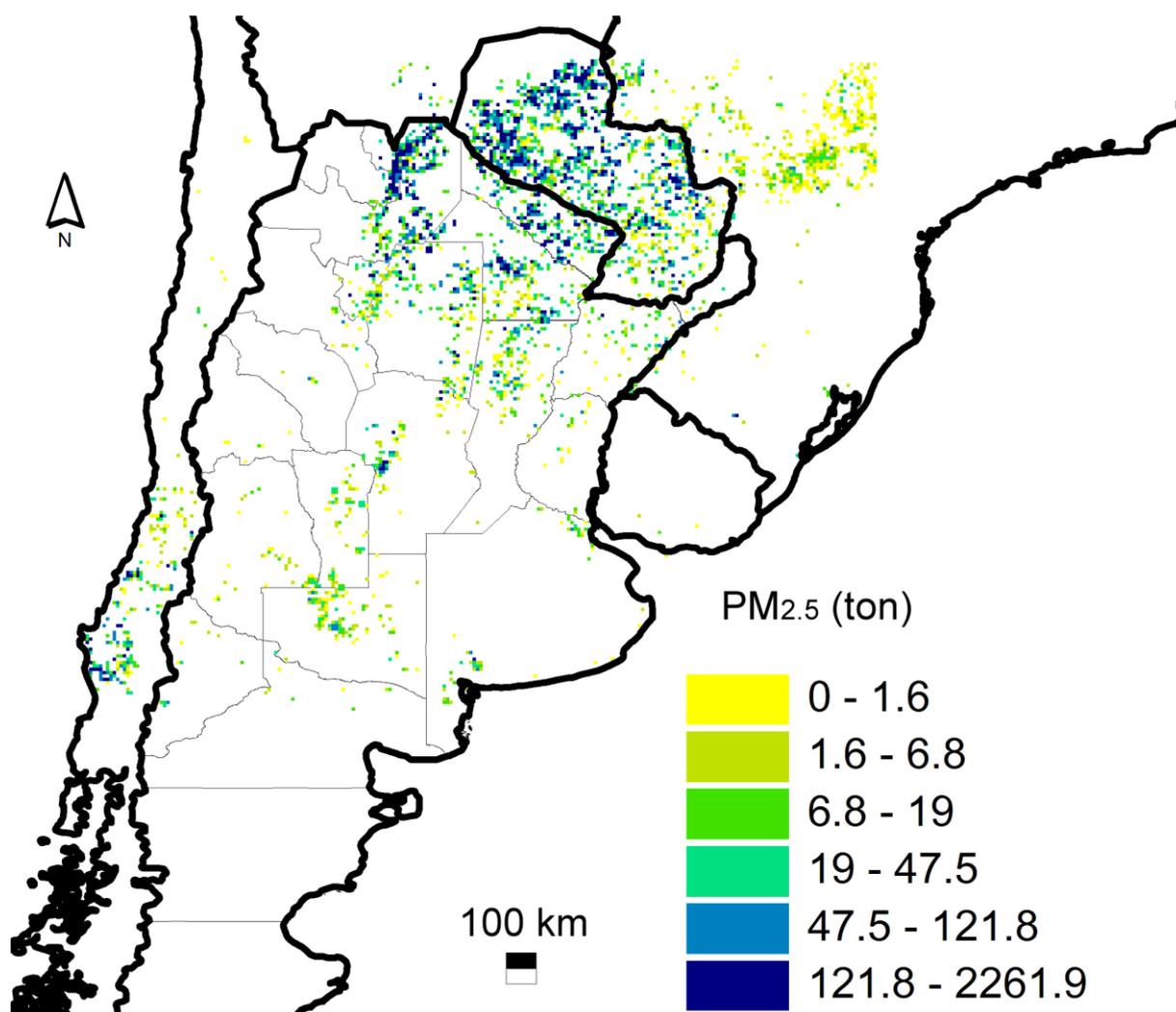
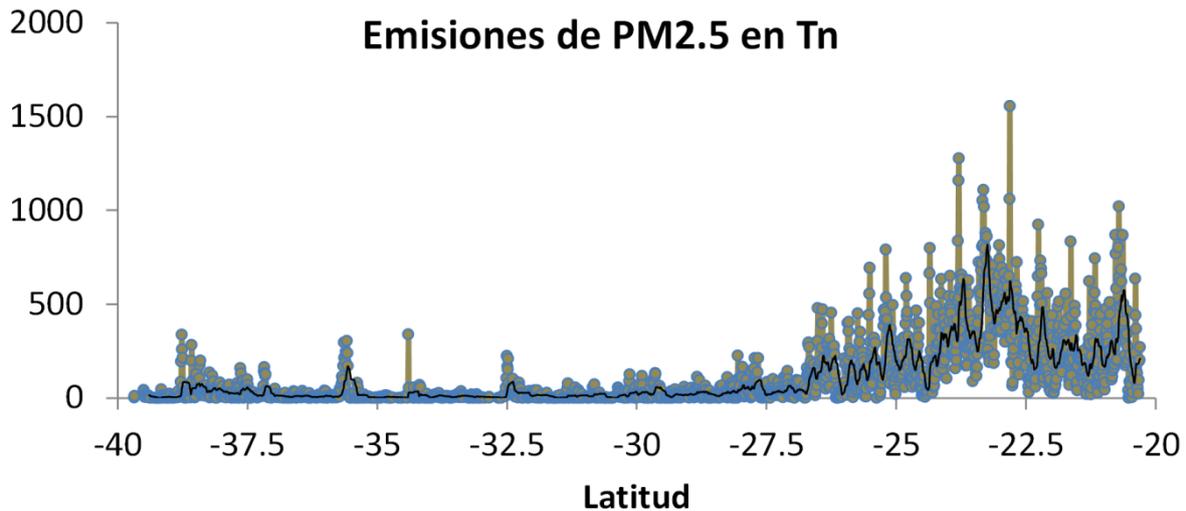


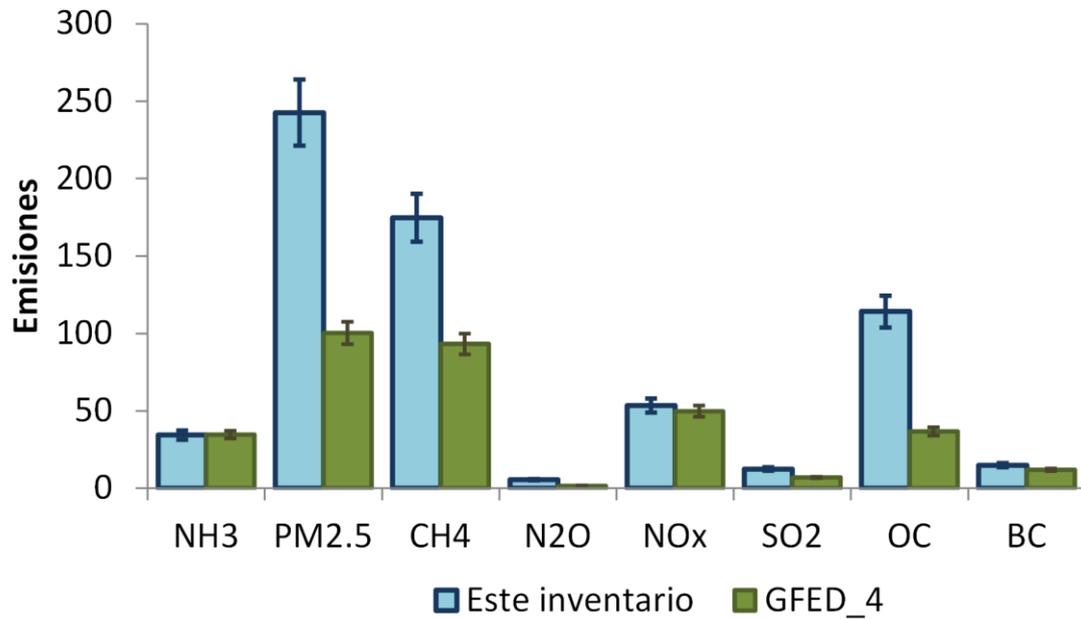
Figura 6. Distribución espacial de las emisiones de PM<sub>2.5</sub> por quema de biomasa en el área de estudio.



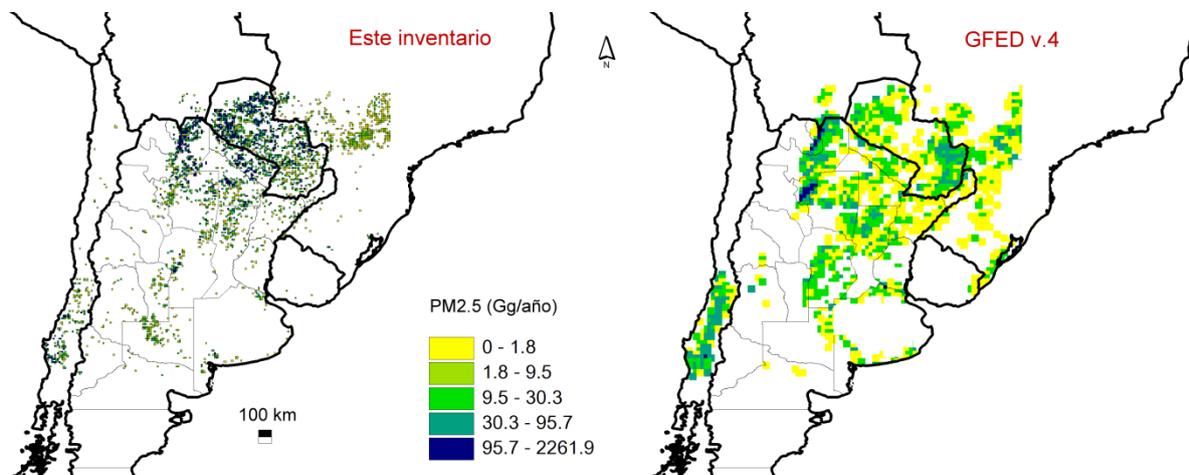
**Figura 7.** Variabilidad de la emisión de partículas por latitud, en el dominio de estudio.

#### 4. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

La Figura 8 y Figura 9 muestran la comparación de los resultados de este estudio con un inventario similar. Las estimaciones grilladas mensuales de emisiones por quema y área quemada de la Global Fire Emissions Database (GFED v4) son tomadas normalmente como base para estudios de gran escala. Este inventario posee una resolución espacial de 0.25 grados y está disponible desde los años 1997 a 2014 [22]. La principal fuente de información para este inventario es el área quemada, derivada de los mapas de MODIS en resolución de 500 m. La completitud de la quema se calcula con un modelo basado en condiciones meteorológicas. Finalmente, factores de emisión típicos [1] se usan para estimar las emisiones.



**Figura 8** Comparación de las emisiones por quema de biomasa para todo el período de estudio, considerando el inventario de este estudio y uno de referencia (GFED, versión 4).



**Figura 9.** Comparación de la distribución espacial de las emisiones por quema de biomasa para  $PM_{2.5}$ , entre el inventario de este estudio y uno de referencia (GFED, versión 4).

Más allá del uso de diferentes productos satelitales para la detección de fuegos y variaciones en los algoritmos de cálculo, existe una gran correspondencia entre los valores totales emitidos, estimados por ambos inventarios. Asimismo, es esperable que la

metodología empleada en este estudio permita incluir fuegos pequeños y de corta duración, a diferencia del inventario GFED. Por otro lado, los factores de emisión para quema agrícolas se revisaron y actualizaron para este estudio, por lo que las emisiones de ese tipo de actividades son levemente diferentes a las estimadas por el inventario de referencia.

En general las diferencias varía entre un 7% para gases y hasta un 40% en las emisiones relacionadas con material particulado. Evaluando patrones estacionales de diferencias, se observó que durante los períodos de baja actividad de quema (marzo a junio), las diferencias entre este inventario y GFED son mínimas y durante los meses de agosto a noviembre las diferencias pueden alcanzar hasta el 161%.

Una fuente de posibles diferencias sería la estimación de áreas quemadas provistas por MODIS en el caso de GFED, ya que por lo general, representa una estimación conservativa de las zonas realmente afectadas por quema. Si bien ambos inventarios presentan aproximadamente el mismo patrón de distribución espacial, existen variaciones locales importantes. Por ejemplo, en zonas mixtas de matorrales y pastizales en la provincia de La Pampa, norte de la Provincia de Buenos Aires y sur de Entre Ríos y Santa Fe, existen puntos de quema que no son detectados por GFED. Por otro lado, la mejora de la resolución espacial del inventario propuesto presenta ventajas es el uso del mismo para la alimentación de modelos de transporte químico (y modelos acoplados) debido a una estimación más precisa de las fuentes.

Con el objeto de mejorar el inventario por quema en el área de estudio, se necesitan trabajos futuros enfocados en la mejora de factores de emisión específicos, caracterizados específicamente para el tipo de vegetación local. Asimismo, es necesario ampliar para observaciones de fuego en varios años, con el objeto de poder evaluar la capacidad del algoritmo en diferentes condiciones. Por otro lado, para complementar este estudio, sería necesario realizar una validación con modelación inversa, basada en trazadores y tomando episodios de quema conocidos, dentro del área de estudio. Finalmente el agregado de variabilidad temporal más precisa ayudaría a mejorar las predicciones en modelado de calidad de aire.

## 5. REFERENCIAS

- [1] M. O. Andreae and E. Merlet, "Emission of trace gases and aerosols from biomass burning," *Glob. Biogeochem. Cycles*, vol. 15, no. 4, pp. 955–966, (2001).
- [2] S. Marshall, J. A. Taylor, R. J. Oglesby, J. W. Larson, and D. J. Erickson, "Climatic effects of biomass burning," *Environ. Softw.*, vol. 11, no. 1–3, pp. 53–58, (1996).
- [3] P. J. Crutzen and M. O. Andreae, "Biomass Burning in the Tropics: Impact on Atmospheric Chemistry and Biogeochemical Cycles," *Science (80-. )*, vol. 250, no. 4988, pp. 1669–1678, (1990).

- [4] S. Y. Ryu, B. G. Kwon, Y. J. Kim, H. H. Kim, and K. J. Chun, "Characteristics of biomass burning aerosol and its impact on regional air quality in the summer of 2003 at Gwangju, Korea," *Atmos. Res.*, vol. 84, no. 4, pp. 362–373, (2007).
- [5] C.-F. Wu, J. Jimenez, C. Claiborn, T. Gould, C. D. Simpson, T. Larson, and L.-J. S. Liu, "Agricultural burning smoke in Eastern Washington: Part II. Exposure assessment," *Atmos. Environ.*, vol. 40, no. 28, pp. 5379–5392, (2006).
- [6] C. R. Estrellan and F. Iino, "Toxic emissions from open burning," *Chemosphere*, vol. 80, no. 3, pp. 193–207, Jun. (2010).
- [7] D. Tian, Y. Hu, Y. Wang, J. W. Boylan, M. Zheng, and A. G. Russell, "Assessment of Biomass Burning Emissions and Their Impacts on Urban and Regional PM<sub>2.5</sub>: A Georgia Case Study," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 43, no. 2, pp. 299–305, (2009).
- [8] K. Tansey, J.-M. Gregoire, D. Stroppiana, A. Sousa, J. Silva, J. M. C. Pereira, L. Boschetti, M. Maggi, P. A. Brivio, R. Fraser, S. Flasse, D. Ershov, E. Binaghi, D. Graetz, and P. Peduzzi, "Vegetation burning in the year 2000: Global burned area estimates from SPOT VEGETATION data," *J. Geophys. Res.*, vol. 109, no. D14, p. D14S03, Jun. (2004).
- [9] L. Giglio, "Characterization of the tropical diurnal fire cycle using VIRS and MODIS observations," *Remote Sens. Environ.*, vol. 108, no. 4, pp. 407–421, (2007).
- [10] S. A. Mckeen, G. Wotawa, D. D. Parrish, J. S. Holloway, M. P. Buhr, G. Hu, F. C. Fehsenfeld, and J. F. Meagher, "Ozone production from Canadian wildfires during June and July of 1995," *Transport*, vol. 107, pp. 1–25, (2002).
- [11] a. I. Calvo, C. Alves, a. Castro, V. Pont, a. M. Vicente, and R. Fraile, "Research on aerosol sources and chemical composition: Past, current and emerging issues," *Atmos. Res.*, vol. 120–121, pp. 1–28, (2013).
- [12] D. M. Mielnicki, P. O. Canziani, and J. Drummond, "Long range transport of biomass burning products over Southern South America: a preliminary assessment of observations," in *8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, (2006).
- [13] G. R. van der Werf, J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, P. S. Kasibhatla, and A. F. Arellano Jr., "Interannual variability in global Biomass burning emissions from 1997 to 2004," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 6, no. 11, pp. 3423–3441, Aug. (2006).
- [14] D. França, K. Longo, B. Rudorff, D. Aguiar, S. Freitas, R. Stockler, and G. Pereira, "Pre-harvest sugarcane burning emission inventories based on remote sensing data in the state of S ao Paulo , Brazil," *Atmos. Environ.*, vol. 99, pp. 446–456, 2014.
- [15] G. Pereira, S. R. Freitas, E. C. Moraes, N. J. Ferreira, Y. E. Shimabukuro, V. B. Rao, and K. M. Longo, "Estimating trace gas and aerosol emissions over South America: Relationship between fire radiative energy released and aerosol optical depth observations," *Atmos. Environ.*, vol. 43, no. 40, pp. 6388–6397, (2009).
- [16] Ministerio da Ciencia e Tecnologia, "Segundo inventario brasileiro de emissoes antropicas de gases do efeito estufa," Brasilia, (2010).
- [17] Z. Li, Y. J. Kaufman, C. Ichoku, R. Fraser, A. Trishchenko, L. Giglio, J. Jin, and X. Yu, "A review of AVHRR-based active fire detection algorithms: Principles, limitations, and recommendations," *Int. J. Remote Sensing*, vol. 20, no. 10, pp. 1947–1985, (1999).

- [18] S. P. Flasse and P. Ceccato, "A contextual algorithm for AVHRR fire detection," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 17, no. 2, pp. 419–424, (1996).
- [19] O. Arino, J. Ramos, V. Kalogirou, P. Defoumy, and F. Achard, "GlobCover 2009," in *ESA Living Planet Symposium*, 2010, p. 686, (2009).
- [20] NOAA-NGDC, "Version 4 DMSP-OLS Nighttime Lights Time Series," 2010. [Online]. Available: <http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/downloadV4composites.html>.
- [21] L. Giglio, "MODIS Collection 4 Active Fire Product User's Guide Version 2.3," (2007).
- [22] L. Giglio, J. T. Randerson, and G. R. van der Werf, "Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4)," *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, vol. 118, no. 1, pp. 317–328, (2013).