



NOTA TÉCNICA

Validación del modelo de calidad del aire BRAMS/TEB en el área metropolitana de Lima

TECHNIC NOTE

Validation of air quality model BRAMS / TEB in the metropolitan area of Lima

JOSÉ CHÁVEZ BARTUREN^{1*}, ODON SÁNCHEZ CCOYLLO¹ &
EDMILSON DIAS DE FREITAS²

¹ Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Lima, Perú.

² Departamento de Ciencias Atmosféricas de la Universidad de Sao Paulo (IAG-USP), Brasil.

* jchavez@senamhi.gob.pe

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó el funcionamiento del modelo BRAMS/TEB (BRAMS versión 4.0) (Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System/Town Energy Budget), haciendo una comparación entre los valores simulados y observados de los gases de dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y ozono (O₃) de la estación de calidad del aire de Ate Vitarte (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, del 14 al 18 de abril del 2010). Los datos de entrada para las condiciones iniciales y de contorno del modelo BRAMS/TEB provienen de NCEP/NCAR (Reanálisis de la National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research), cuya resolución espacial y temporal es de 2,5° y de 6 horas respectivamente; las variables meteorológicas que se utilizaron fueron: viento zonal y meridional, humedad relativa, altura geopotencial y temperatura del aire. Posteriormente se procedió a correr el modelo BRAMS/TEB para dicho periodo, utilizando el Inventario de emisiones anuales de fuentes móviles y fijas de la ciudad de Lima-Callao.

Los resultados obtenidos muestran que las concentraciones observadas de SO₂, NO₂ y O₃ son bien representadas por el modelo BRAMS/TEB, tanto en su comportamiento diario como en sus estadísticos.

Palabras claves: Modelos de calidad del aire, calidad del aire, modelación atmosférica.

ABSTRACT

The performance of the BRAMS/TEB model (BRAMS version 4.0) (Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System/Town Energy Budget), was evaluated making a comparison between simulated and observed sulfur dioxide (SO₂), nitrogen dioxide (NO₂) and ozone (O₃) gases, at the air quality station of Ate Vitarte (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), from 14 to 18 April 2010). The input data for the initial and boundary conditions come from NCEP/NCAR (Reanalysis of the National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research), whose spatial and temporal resolution is 2.5° and 6 hours, respectively; and meteorological variables used were: zonal and southern wind, relative humidity, geopotential height and air temperature. Then, the BRAMS/TEB model was run for that period, using the Annual Emissions Inventory of Mobile and Fixed sources of Lima-Callao city.

The results obtained show that the simulated variables, such as the concentrations of SO₂, NO₂ and O₃ are well represented by the BRAMS / TEB model, both in its daily and statistical behavior.

Keywords: Models of air quality, air quality, atmospheric modeling.

INTRODUCCIÓN

Desde la década de los ochenta los modelos de predicción numérica han ido evolucionando en complejidad y su desempeño cada vez es mejor, sin embargo en los últimos años su evolución no ha sido homogénea pues las previsiones presentan incertidumbres. Éstas pueden deberse a las condiciones iniciales, resolución del modelo, parametrización deficiente de los procesos físicos o de variables límite como la orografía, condiciones de superficie (albedo, vegetación, etc.) y condiciones de contorno (García-Moya 2004).

En los últimos años la preocupación por la calidad del aire se ha convertido en un tema de interés en el Perú. Una de las herramientas para conocer los impactos negativos en la calidad del aire es la utilización de modelos numéricos, en este trabajo se ha utilizado el modelo BRAMS/TEB (Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System/ Town Energy Budget).

El BRAMS está basado en el modelo RAMS (Regional Atmospheric Modelling System) desarrollado por la Universidad Estatal de Colorado (Estados Unidos de Norte América) a partir de la combinación de un modelo no hidrostático local (Tripoli & Cotton 1980, 1982, 1989, Tripoli & Cotton 1989b, Cotton et al. 1982) y dos modelos meteorológicos hidrostáticos mesoescalares (Pielke 1974, Mahrer & Pielke 1977, McNider & Pielke 1981, McCumber & Pielke 1981, Tremback et al. 1985). El RAMS comenzó su desarrollo a principios de los años ochenta. Actualmente dispone de un gran número de opciones físicas, las cuales pueden ser seleccionadas por el usuario. Todos los procesos físicos asociados a la formación de nubes, precipitación, transferencia de radiación, transporte turbulento de calor, humedad y la interacción con la superficie pueden ser activados, incluye la capacidad de trabajar con anidamientos múltiples, la opción de ser empleado como modelo no hidrostático, posee la capacidad de asimilar datos de observaciones meteorológicas e incorpora los últimos avances en parametrizaciones físicas. Un ejemplo de estas parametrizaciones son la representación de procesos de emisión de contaminantes y su dispersión en la atmósfera (Freitas et al. 2005) y también, la representación de la estructura urbana (Masson 2000, Freitas et al. 2007).

La emisión de contaminantes atmosféricos representa una situación de peligro real para la población y ambiente en general, por ello es importante analizar la calidad del aire para establecer cuál es el nivel de desviación a partir de las normas contenidas en la legislación nacional. El objetivo del presente trabajo es evaluar el funcionamiento del Modelo BRAMS/TEB mediante las simulaciones de los contaminantes SO₂, NO₂ y O₃ con la finalidad de conocer la performance y limitaciones del modelo para la Región Metropolitana de Lima (RML).

MODELO BRAMS/TEB

El modelo BRAMS es una versión modificada del RAMS (Regional Atmospheric Modeling System, Cotton et al. 2003) adaptado a América del Sur por investigadores de la Universidad de São Paulo (USP), el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), la Universidad Federal de Campina Grande (UFCG) y de otros centros de investigación de Brasil (Longo et al. 2007, Carvalho 2010).

BRAMS/TEB es un modelo atmosférico regional de última generación, no hidrostático y posee capacidad de anidado múltiple interactivo. Los diferentes procesos físicos (radiación, convección profunda y no profunda, turbulencia, interacción atmósfera-superficie, microfísica de nubes) se encuentran representados por distintos tratamientos como parametrizaciones de Radiación (Chen & Cotton 1983), parametrizaciones de microfísica de nubes (Walko et al. 1995) y convección (Kuo 1974, Grell 1993, Grell & Devenyi 2002).

Acoplamiento del Sistema TEB

El modelo posee una compleja representación de los procesos que ocurren en las interfaces entre suelo, superficie y atmósfera. Para esta representación el BRAMS utiliza el LEAF-3 (Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model, Walko et al. 2000). El LEAF-3 es una representación de los aspectos de superficie, incluyendo vegetación, suelo, lagos, océanos, cobertura de nieve y sus interacciones.

Para áreas urbanas, como una subrutina de LEAF-3, el BRAMS utiliza el *Town Energy Budget* (TEB-Masson 2000). En el esquema TEB utiliza una geometría de *canyon* (espacio entre los lados

de los edificios) local para tener una mejor representación de las áreas urbanizadas, permitiendo mejores balances radiactivos, calor turbulento y flujos de superficie, a través de un tratamiento físicamente apropiado. En los centros urbanos se liberan grandes cantidades de calor y humedad a la atmósfera como consecuencia de la actividad humana. El TEB considera los flujos de calor sensible y latente producidos por la actividad industrial o residencial y por el tráfico de vehículos (Freitas 2003) además es acoplado a una representación simplificada de los procesos químicos producidos en la atmósfera. Esta representación ha sido llamada SPM (Simple Photochemical Module, Freitas et al. 2005).

ÁREA DE ESTUDIO

Región Metropolitana de Lima (RML)

La ciudad de Lima se encuentra ubicada en la costa central del Perú, frente al océano Pacífico, a una altitud comprendida entre 100 a 850 msnm; la temperatura del aire oscila entre 11 °C en invierno y 28 °C en verano y la humedad relativa varía entre 80 y 100% durante todo el año. Su ubicación geográfica comprende desde el kilómetro 50 de la Panamericana norte, a la altura del distrito de Ancón en el límite con la provincia de Huaral, hasta el distrito de Pucusana, a la altura del kilómetro 70 de la Panamericana sur, en el límite de la provincia de Cañete. Lo que comprende una extensión de poco más de 130 km de costa y playas. Hacia el este se extiende hasta aproximadamente el kilómetro 50 de la Carretera central en el distrito de Chosica, límite con la provincia de Huarochirí (Figura 1).



Fig. 1. Mapa de ubicación de la estación de calidad del distrito de Ate.

METODOLOGÍA

Configuración del Modelo (BRAMS /TEB)

Para la simulación numérica con BRAMS/TEB se han configurado 3 dominios anidados de 64 km, 16 km, y 4 km para las grillas 1 (color verde), 2 (color rojo) y 3 (color celeste), respectivamente. El dominio de las tres grillas se muestra en la Figura 2. El primer dominio abarca todo el Perú, el segundo el departamento de Lima y el tercero Lima Metropolitana. La Tabla 1 muestra las características de los dominios del modelo BRAMS/TEB utilizadas en esta validación.

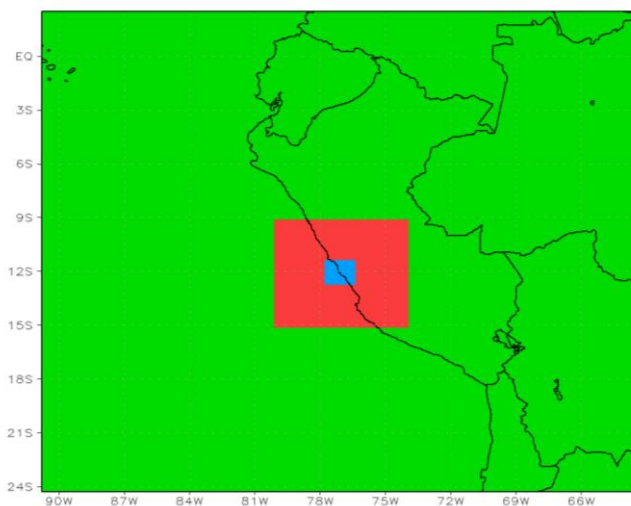


Fig. 2. Dominios del modelo.

Tabla 1. Características de las tres grillas utilizadas en esta validación.

CARACTERÍSTICAS	DETALLES		
	1er Dominio	2do Dominio	3er Dominio
Identificación de la grilla			
N° de puntos en X	48	42	38
N° de puntos en Y	48	32	38
Resolución espacial	64 km	16 km	4 km
Centro-Latitud (°S)	-11,0	-12,0	-12,07
Centro-Longitud (°W)	-77,0	-77,0	-77,07

Datos de entrada

La información meteorológica de entrada proviene de las salidas de los modelos meteorológicos globales del Reanálisis de la NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research) y tienen una resolución espacial de 2,5° y temporal de 6 horas; las variables meteorológicas que se utilizaron para las condiciones iniciales del modelo son: viento zonal y meridional ($m.s^{-1}$), humedad relativa (%), altura geopotencial (m) y temperatura (°C).

Inventario de emisiones

La Tabla 2 muestra la estimación del inventario de emisiones de partículas totales en suspensión (PTS), SO₂, NO₂, CO, plomo y compuestos orgánicos volátiles (COV) del parque automotor de Lima-Callao.

Tabla 2. Estimación de las emisiones del parque automotor de Lima-Callao. Fuente: Diagnóstico de las emisiones del parque automotor del área metropolitana de Lima y Callao por Marcelo E. Korc, Aida Figari Bello, Adriana Bravo y José Pareja. Recuperado el 2 de mayo del 2009.

Categorías	Porcentaje de emisiones					
	PTS	SO ₂	NO ₂	CO	Pb	COV
Automóviles	5	4	6	13	31	21
Taxis y moto-taxis	16	12	21	68	51	46
Camionetas- Pick up, rural y panel	21	19	11	13	16	16
Camiones, buses y remolcadores	58	65	62	6	2	17
Emisiones (toneladas.año ⁻¹)	6 205	11 261	70 501	329 814	203	72 512

Datos de superficie

La información de los contaminantes gaseosos (SO₂, NO₂ y O₃) provienen de la estación de calidad del aire (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) ubicada en el distrito de Ate-Vitarte (12° 1'34" S, 76° 55' 7" W y localizado a 362 msnm) departamento de Lima.

Análisis Estadístico

Para analizar los resultados cuantitativos se utilizó el coeficiente de correlación lineal de Pearson (Wilks 1995) que está dado por la razón de la covarianza existente entre las dos variables y el producto de sus desviaciones estándar (ecuación 1).

$$r_{xy} = \frac{COV(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \dots \dots \dots (1)$$

$$= \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left\{ \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2} \right\}}$$

Si bien las correlaciones proporcionan una buena información sobre la relación lineal entre las simulaciones y observaciones, no toman en cuenta los desvíos (*bias*) que puedan estar presentes en las series de tiempo, por ello es necesario utilizar métodos complementarios que posibiliten identificar cuál de las parametrizaciones proporciona mejores resultados. Uno de estos métodos es el error medio (ME) que está dado por la ecuación (2).

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - O_k) = \bar{y} - \bar{O}, \dots \dots \dots (2)$$

Simplemente es la diferencia entre la media de las simulaciones y la media de las observaciones, por lo tanto expresa el desvío de la simulación. El error medio es representativo de toda la serie de simulaciones, pero no proporciona información sobre errores individuales, representa una medida de precisión. Las simulaciones que en promedio son mayores que las observaciones presentan error medio (ME) mayor que cero (ME>0) y la simulaciones que en media son menores que las observaciones presentan error medio (ME) menor que cero (ME<0).

Para medir la precisión de las simulaciones utilizamos el error medio cuadrático (MSE) que está dado por la ecuación (3):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - O_k)^2 \dots \dots \dots (3)$$

Que es la media cuadrática de las diferencias entre las simulaciones y las observaciones; valores altos del error cuadrático medio (MSE) indican alto nivel de discrepancia entre las simulaciones y observaciones. La raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) tiene las mismas dimensiones de las simulaciones y observaciones, por lo tanto puede ser considerada como la magnitud típica de los errores de las simulaciones.

Pielke (2002) presenta otro parámetro que es la raíz cuadrada del error medio cuadrático después de sacar una desviación media ($RMSE_{UB}$) para evaluar la habilidad de una simulación y está dado por la ecuación (4).

$$RMSE_{UB} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [(y_k - \bar{y}) - (O_k - \bar{O})]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (4)$$

Es importante notar este procedimiento considera que la distribución de los datos es aproximadamente normal. Los análisis que se realizaron en este trabajo no tienen en cuenta este hecho y sirven sólo como un complemento a otros parámetros que serán analizados. Según Pielke (2002) la habilidad de una simulación se ha demostrado con las siguientes condiciones: 1) $\sigma_{sim} \cong \sigma_{obs}$; 2) $RMSE < \sigma_{obs}$; 3) $RMSE_{UB} < \sigma_{obs}$, donde σ_{obs} y σ_{sim} son las desviaciones estándar de las observaciones y las simulaciones.

RESULTADOS

La concentración de NO_2 (Figura 3) fue bien representada por el modelo BRAMS/TEB para los primeros 2 días (48 horas) tanto en los valores máximos como en los mínimos; para los siguientes 3 días se observó una diferencia en las concentraciones entre simuladas y observadas.

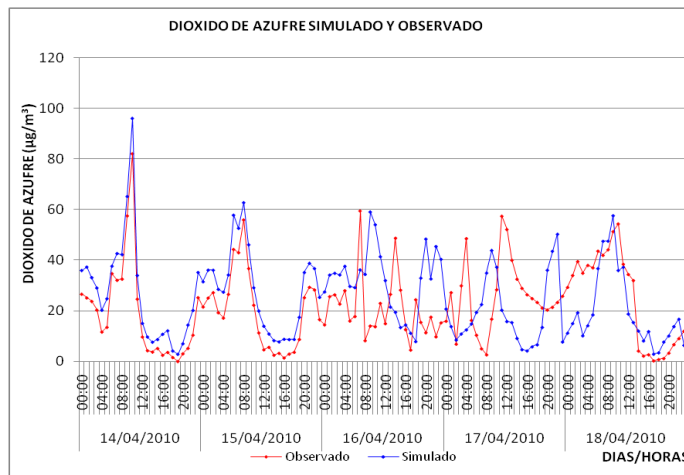


Fig. 3. Comparación entre SO_2 observado (estación de Calidad de Aire de Ate-Vitarte, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) y simulado por el modelo BRAMS/TEB. Las Simulaciones fueron realizadas en el período del 14 de abril a las 00Z al 18 de abril a las 23 Z del 2010.

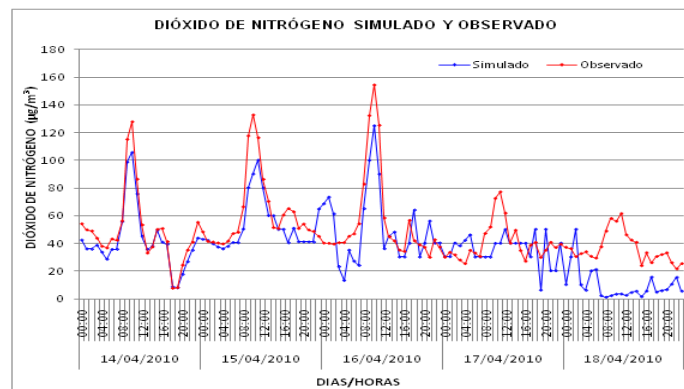


Fig. 4. Comparación entre NO_2 observado (estación de Calidad de Aire de Ate-Vitarte, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) y simulado por el modelo BRAMS/TEB. Las Simulaciones fueron realizadas en el período del 14 de abril a las 00Z al 18 de abril a las 23 Z del 2010.

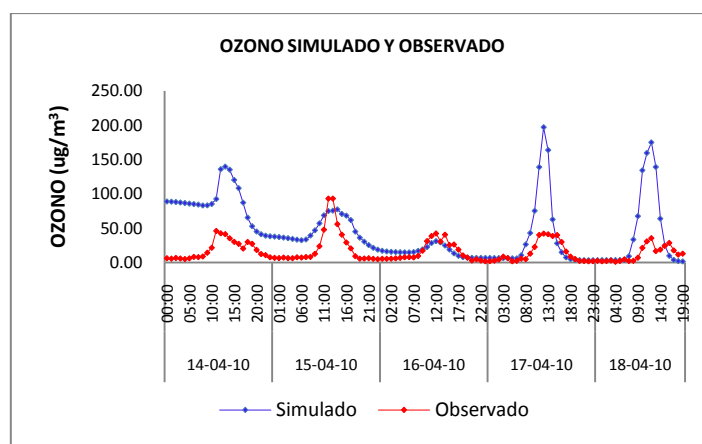


Fig. 5. Comparación entre datos de la estación de Calidad de Aire de Ate-Vitarte, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, y las simulaciones utilizando el modelo BRAMS/TEB para el Ozono en superficie (O_3). Las Simulaciones fueron realizadas en el período del 14 de abril a las 00Z al 18 de abril a las 23 Z del 2010.

Los resultados para la serie de NO_2 (Figura 4) muestran que el modelo representa bien las oscilaciones observadas en el ciclo diurno para los primeros cuatro días y en el quinto día presentó una mayor variabilidad, las simulaciones son mucho menores que las observaciones. La Figura 5 muestra que la concentración de ozono en superficie fue regularmente representada por el modelo para los tres primeros días (14, 15 y 16 de abril 2010) tanto en el día como en la noche (picos máximos y mínimos), después para los dos siguientes días (17 y 18 de abril 2010) se observó que los picos máximos son sobreestimados por el modelo. En general podemos decir que la concentración de ozono no es muy bien representada por el modelo.

Del análisis estadístico para el SO_2 (Tabla 3) se observó que el RMSE y el $RMSE_{UB}$ son menores que la desviación estándar observada (σ_{obs}) y las desviaciones estándares simuladas (σ_{sim}) y observadas (σ_{obs}) son equivalentes, por tanto podemos decir que las simulaciones fueron bien representadas por el modelo porque cumplen con las condiciones de Pielke.

Tabla 3. Resultados del modelo: SO_2 , NO_2 y O_3 .

RESULTADOS PARA DIÓXIDO DE AZUFRE (SO_2)					
Simulación	R	RMSE	$RMSE_{UB}$	σ_{obs}	σ_{sim}
SO_2	0,55	15,37	15,33	16,53	16,02
NO_2	0,84	7,2	6,93	12,19	7,62
O_3	0,51	13,42	14,28	18,86	18,05

En cambio NO_2 (Tabla 3) mostró un coeficiente de correlación alto ($R=0,84$); es decir existe muy buena correlación entre las simuladas y las observadas, además el RMSE y $RMSE_{UB}$ cumplen con los criterios propuestos por Pielke (2002). Los resultados estadísticos para el ozono (Tabla 3) muestran un coeficiente de correlación de Pearson de 0,51, el más bajo comparado con SO_2 y el NO_2 , pero los errores RMSE y $RMSE_{UB}$ son menores que la desviación estándar observada y las desviaciones estándares simuladas (σ_{sim}) y observadas (σ_{obs}) son equivalentes, por lo que podemos decir que cumplen con los criterios propuestos por Pielke (2002).

CONCLUSIONES

Los resultados de la simulación numérica del modelo BRAMS/TEB son satisfactorios y aceptables porque cumplen con el análisis estadístico y condiciones dadas por Pielke. Estos resultados son útiles para derivar conclusiones y análisis sobre el comportamiento de los contaminantes analizados en la atmósfera, en especial los gases dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2) y ozono (O_3).

Se ha implementado y configurado el modelo BRAMS/TEB para Lima con una resolución espacial de 4 km en el tercer dominio, dominio más fino y temporal de una hora.

Los resultados obtenidos de la concentración de dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y ozono (O₃) son bastante confiables o son bien representados por el modelo para las primeras 48 horas. Mientras los índices estadísticos para las concentraciones de ozono en superficie (O₃) no son satisfactorios. Las simulaciones y observaciones siguen el mismo ciclo tanto en los máximos como en los mínimos durante todo el período de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dra. Laura Gallardo de la Universidad de Chile, al proyecto SAEMC (South American Emissions, Megacities and Climate) financiado por el IAI (Inter-American Institute for Global Change Research), al proyecto SNIP 9871 "Implementación de un servicio de pronóstico de la calidad del aire en la zona Metropolitana Lima-Callao". Se agradece a todo el personal de la Dirección General de Investigación y Asuntos Ambientales de SENAMHI por su incondicional apoyo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carvalho, V. (2010). Impacto das megacidades sobre a qualidade do ar: os casos das regiões metropolitanas de São Paulo e do Rio de Janeiro. Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 232 pp.
- Chen, C. & Cotton, W. R. (1983). One dimensional simulation of the stratocumulus capped mixed layer. *Boundary Layer Meteorology*, 25: 289-3321.
- CONAM (2001). Primera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Nacional sobre Cambio Climático. Consejo Nacional del Ambiente, Lima 2001.
- Cotton, W.R., Pielke, R.A., Walko, R.L., Liston, G.E., Tremback, C., Jiang, H., McAnelly, R.L., Harrington, J.Y., Nicholls, M.E., Carrio, G.G. & Mac Faden, J.P. (2003). Rams 2001: Current States and Future directions. *Meteorology Atmospheric Physics*, 82:5-29.
- DGSA (2005). Resultados del Inventario de emisiones de fuentes fijas. Cuenca Atmosférica de la ciudad de Lima-Callao, Dirección General de Salud Ambiental. Lima, Perú.
- Freitas, E. D. (2003). Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes. Tese de Doutorado. Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. 156pp.
- Freitas, E., D. Martins, L., D. Silva Dias, P. L. & Andrade, M. F. (2005). A simple photochemical module implemented in Rams for tropospheric ozone concentration forecast in the Metropolitan Area of São Paulo - Brazil: Coupling and validation. *Atmospheric Environment*, 39(34): 6352-6361.
- Freitas, E. D., Rozoff, C, Cotton, W. R. & Silva Dias, P. L. (2007). Interactions of an urban heat island and sea breeze circulations during winter over the Metropolitan Area of São Paulo Brazil (2007). *Boundary-Layer Meteorology*, 122(1): 43-65.
- García-Moya, Z. J. (2004). Los modelos numéricos de predicción del tiempo. *Tethys*, 2:5.
- Grell, G. A. (1993). Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterization. *Monthly Weather Review*, 121: 764-787.
- Grell, G. A. & Devenyi, D. (2002). A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 29(14): 1693, doi:10.1029/2002GL015311.
- Korc, M.E., Figari, A.B., Bravo, A., Pareja, J. (2009). Diagnóstico de las emisiones del parque automotor del área metropolitana de Lima y Callao. <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaidis/impactos/vi-105.pdf>
- Kuo, H. L. (1974). Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large scale flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31:1232-1240.
- Longo, K., Freitas, S. R., Setzer, A., Prins, E., Artaxo, P. & Andreae, M. (2007). The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS). Part 2: Model sensitivity to the biomass burning inventories. *Atmospheric Chemistry Physics*, 10: 8571-8595.
- Masson, V. (2000). A Physically-Based Scheme for the Urban Energy Budget in Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94: 357-397.
- McNider, R. T. & Pielke, R. A. (1981). Diurnal boundary-layer development over sloping terrain. *Journal Atmospheric Sciences*, 38: 2198-2212.
- McCumber, M. C. & Pielke, R. A. (1981). Simulation of the effects of surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model. Part I: Soil layer. *Journal Geophysical Research*, 86: 9929-9938.
- Mahrer, Y. & Pielke, R. A. (1977). A numerical study of the airflow over irregular terrain. *Beitriige zur Physik der Atmosphäre*, 50: 98-113.
- MEM (2002). Balance Nacional de Energía 2000. Ministerio de Energía y Minas. Lima, Perú.
- MTC (2004). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero y Contaminantes Criterio del Sector Transportes. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Lima, Perú.
- Pielke, R.A., Cotton, W.R., Walko, R.L., Tremback, C.J., Lyons, W.A., Grasso, L.D., Nicholls, M.E., Moran, M.D., Wesley, D.A., Lee, T.J. & Copeland, J.H. (1992). A comprehensive meteorological modeling system- Rams. *Meteorology Atmospheric Physics*, 49(1-4): 69-91.

- Pielke, R.A. (2002). Mesoscale meteorological modeling. International Geophysics Series. Second Edition. Academic Press, 676 pp.
- Sánchez, C.O.R. (1998). “Interação entre os Poluentes Atmosféricos e a Circulação Local na Cidade de São Paulo“. Tesis de maestría en el departamento de Ciencias Atmosféricas de la Universidad de São Paulo, Brasil.
- Sanchez, C.O.R. (2002). “Identificação da Contribuição das Fontes Locais e Remotas de Poluentes na Região Metropolitana de São Paulo”. Tesis de maestría en el departamento de Ciencias Atmosféricas de la Universidad de São Paulo, Brasil
- Tremback, C.J. (1990). Numerical simulation of a mesoscale convective complex: model development and numerical results. Ph.D. Diss., Atmospheric Science Paper N°. 465, Colorado State University, Dept. of Atmospheric Science, Fort Collins, USA.
- Tremback, C. J., Tripoli, G. J. & Cotton, W. R. (1985). A regional scale atmospheric numerical model including explicit moist physics and a hydrostatic time-split scheme. Preprints, 7th AMS Conference on Numerical Weather Prediction, June 17-20, Montreal, Quebec, Canada, American Meteorological Society. Boston, 433-434.
- Tripoli, G. J. & Cotton, W. R. (1980). A numerical investigation of several factors contributing to the observed variable density of deep convection over south Florida. *Journal Applied Meteorology*, 19: 1037–1063.
- Tripoli, G. & Cotton, W.R. (1989a) A numerical study of an observed orogenic mesoscale convective system. Part 1. Simulated genesis and comparison with observations. *Monthly Weather Review*, 117: 273-304.
- Tripoli, G. & Cotton, W.R. (1989b). A numerical study of an observed orogenic mesoscale convective system. Part 2. Analysis of governing dynamics. *Monthly Weather Review*, 117: 305-328.
- Tripoli, G.J. & Cotton, W.R. (1982). The Colorado State University three-dimensional cloud/mesoscale model-1982. Part I: General theoretical framework and sensitivity experiments. *Journal Research Atmospheric*, 16: 185-220.
- Walko, R.L., Tremback, C.J., Pielke, R.A. & Cotton, W.R. (1995). An interactive nesting algorithm for stretched grids and variable nesting ratios. *Journal Applied Meteorology*, 34:994-999.
- Walko, R.L., Cotton, W.R., Meyers, M.P. & Harrington, J.Y. (1995). New RAMS cloud microphysics parametrization. Part I: the single-moment scheme. *Atmospheric Research*, 38:29-62.
- Walko, R. L., Band, L. E., Baron, J., Kittel, T. G. F., Lammers, R., Lee, T. J., Ojima, D., Pielke, R. A., Taylor, C., Tague, C., Tremback, C. J. & Vidale, P. L. (2000). Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling. *Journal Applied Meteorology*, 39 (6):931-944.
- Wilks, D.S. (1995). Statistical methods in the atmospheric sciences, Academic Press, San Diego, 467 pp.