

DETERMINACION DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA PARA EL MODELO DE CALIDAD DE AIRE DE BOGOTA EMPLEANDO CHIMERE

Juan Pablo Aristizábal¹, Néstor Y. Rojas^{1*}, Alain Clappier², Nadège Blond²

¹ Grupo Calidad del Aire. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental,
Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Carrera 45 No 26-85, Ed. 412 Of.
206. Bogotá.

² Laboratoire Image, Ville et Environnement (LIVE), Universidad de Estrasburgo. 3 rue
de l'Argonne 67000 Estrasburgo

* Tel (571)3165000 ext 14304, Fax (571)3165000 ext 14302, nyrojasr@unal.edu.co

RESUMEN

Para el presente trabajo se emplearon los modelos *WRF* y *CHIMERE* para determinar las condiciones de frontera para el modelo de calidad de aire de la Ciudad de Bogotá.

Las simulaciones se realizaron con datos correspondientes al periodo comprendido entre diciembre de 2007 y enero de 2008. Todas las simulaciones, tanto para el modelo meteorológico como el de calidad de aire, se realizaron en periodos consecutivos de simulación de 5 días. Para ambos modelos se seleccionaron dominios de simulación que abarcaban todo el territorio colombiano.

Se realizó una comparación cualitativa de los datos arrojados por el modelo meteorológico *WRF* y se obtuvo que para las modelaciones realizadas a mesoescala, éste representa correctamente los fenómenos que ocurren en el dominio seleccionado.

Los resultados de las simulaciones obtenidas a través del modelo de calidad de aire *CHIMERE* fueron comparados contra los datos de medición de diferentes estaciones de monitoreo. Se observó que todas mostraban la influencia de la estela de contaminantes, asociados a la contaminación de ciudades y zonas industriales, mientras que en todas las simulaciones realizadas se mostraba el comportamiento típico de mesoescala con

concentraciones inferiores a las reportadas en las estaciones de monitoreo debido al efecto de la dilución.

Los archivos de salida del modelo CHIMERE sirven como archivos de entrada de condición de frontera para el modelo TAPOM, el cual actualmente es utilizado como modelo de calidad de aire para Bogotá.

La presentación de este trabajo se realizará a manera de Póster.

1.- Introducción

Bogotá es uno de los centros urbanos más grandes en Latino América con más de 8 millones de habitantes, 1.3 millones de vehículos y más de 20.000 industrias a pequeña escala. Durante los últimos 20 años, su rápido crecimiento y su actividad industrial han causado un impacto negativo significativo en la calidad de aire de la ciudad, en la salud humana y el ambiente.

Bogotá está ubicada sobre una enorme sabana a 2.630 metros sobre el nivel del mar en los Andes colombianos. Esta altitud, combinada con sus 4°N de latitud le da a la ciudad un clima agradable con temperatura promedio de 16°C durante el año [12].

El modelo de calidad de aire de Bogotá se implementó en el 2004; este opera con en el modelo meteorológico *FVM* (Finite Volume Model) y el modelo de transporte de contaminantes atmosféricos *TAPOM* (Transport and Air Pollution Model). Desafortunadamente, el modelo no fue usado para evaluar la efectividad de las políticas diseñadas para la descontaminación del aire en la ciudad en los últimos años, debido a diversas dificultades operativas.

Como un esfuerzo para contar con mejores resultados y un uso continuo del modelo, se enfoco este trabajo en la obtención de las condiciones de frontera para el modelo de calidad de aire de Bogotá. Se empleo el modelo *WRF* (Weather Research and Forecasting) para determinar las condiciones de frontera meteorológicas y el modelo Europeo *CHIMERE* para la simulación de los procesos fotoquímicos y de transporte de contaminantes en la atmósfera.

2.-Metodología

Para el presente trabajo, se seleccionaron los meses de Diciembre de 2007 y Enero de 2008 como los periodos de interés para las simulaciones. Este periodo fue seleccionado para tener consistencia con el desarrollo de la modelación de calidad del aire para Bogotá empleando el modelo meteorológico *FVM* y el modelo de calidad de aire *TAPOM*, la cual se basa en los inventarios de emisiones actualizados con información de 2007/2008.

Se obtuvieron datos de concentraciones de contaminantes atmosféricos horarios, así como datos de condiciones meteorológicas en diversos puntos en el territorio colombiano. Se seleccionaron estaciones que por sus características [1] representaran condiciones regionalmente representativas y no de “sitios” específicos a la escala de la simulación regional dentro del dominio como por ejemplo una ciudad.

La información que se ha utilizado como entrada al modelo proviene de bases de datos especializadas. Para cada uno de los modelos se requiere información específica para cada uno de sus pasos de operación.

Todos los datos meteorológicos se obtuvieron de *NCEP Global Tropospheric Analysis*. Esta base de datos cuenta con información procesada de mediciones efectuadas cada 6 horas (*GMT*) tomados con una resolución 1° x 1° a nivel mundial, dando como resultado 4 archivos con información meteorológica por día. El conjunto de datos para topografía y uso del suelo para todo el planeta pueden ser obtenidos a través de la página de *WRF*¹. La información obtenida en esta página se encuentra en diferentes resoluciones que van desde cada 10' (aproximadamente 18,5 km) hasta cada 30'' (aproximadamente 900 m).

Las emisiones para la región a simular fueron tomadas de *EDGAR (Emission Data Base for Global Atmospheric Research)*. Todas estas emisiones están reportadas grado a grado y las únicas disponibles están para el año 2000. Como tal, *CHIMERE* no reconoce las emisiones en el formato *EDGAR*, ya que está programado para leer emisiones de

¹ http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Basics/GEOGRID/ter_data.htm

EMEP. Por lo tanto, fue necesario emplear un código generado por los miembros del *LIVE*² para poder emplear este tipo de archivo.

La duración de cada una de las simulaciones depende del tiempo de estabilización y de iniciación que requiere cada uno de los modelos para poder empezar a arrojar datos precisos. Durante este trabajo, se empezó a hacer simulaciones sucesivas con el modelo meteorológico en periodos de 2 días de duración y posteriormente se hicieron de 4 y 5 días. Todas las simulaciones del modelo de calidad de aire se realizaron en periodos de 5 días, de los cuales los 2 primeros son de estabilización y los 3 últimos días de simulación válida [4].

La resolución de las simulaciones esta directamente ligada a la precisión de los datos de entrada (Inputs) y al tamaño del dominio que se va a simular. Para cada uno de los modelos, se escogieron diferentes resoluciones, ya que había diferencia en la calidad entre los diversos tipos de datos de entrada.

Para el modelo *WRF*, se tomó como tamaño de celda 16,2 km * 16,2 km. Este valor se obtiene por defecto al emplear la herramienta de visualización *Domain Wizard*, la cual permite observar el dominio que se está simulando y establecer sus límites, de igual manera esta herramienta permite definir si se necesitan dominios anidados.

Las coordenadas del centro del dominio fueron para este caso 4,497° de latitud Norte y 72,811° de longitud Oeste. En total se hicieron 100 divisiones del dominio principal en dirección oeste-este y 137 divisiones en la dirección Sur-Norte para un total de 13700 celdas de modelo, abarcando un área de 3'595.428 km².

Para el modelo *CHIMERE*, se hicieron modelaciones con dos diferentes tamaños de celda. Se emplearon celdas cuadradas de lado de 0,5° (equivalente a 55,5 km) de 0,25° (equivalente a 27,75 km). En este modelo el punto de partida desde el cual se calcula el dominio del modelo es la esquina Suroeste.

Para las dos primeras modelaciones se fijó un punto de partida con las coordenadas 4,2° de latitud Sur y 79,8° de longitud oeste. Las dimensiones del dominio fueron de 1554 km en dirección oeste-este y de 1831,5 km en la dirección Sur-Norte, abarcando un área

² LIVE Laboratoire Image Ville Environnement, Universidad de Estrasburgo

de 2'846.151 km². Las modelaciones de 0,10° fueron parte de una serie de simulaciones anidadas centradas en Bogotá y en Cali respectivamente.

Para el caso de la modelación con tamaño de celda de 0,5°, se dividió el dominio en 28 pasos en la dirección oeste-este y 33 pasos en la dirección Sur-Norte, para un total de 924 celdas. En el caso de modelación con tamaño de celda de 0,25°, se duplicó el número de divisiones en ambas direcciones, obteniendo como resultado un total de 3696 celdas.

En los resultados de modelación meteorológica, sólo se tomaron en cuenta para validación los obtenidos en el mes de enero. Todas las modelaciones realizadas para el mes de diciembre sirven como inicialización y estabilización del modelo.

Los tamaños de celda para la simulación con CHIMERE se seleccionaron para poder determinar la coherencia de los resultados en ambas escalas, teniendo en cuenta que los datos de entrada del modelo (emisiones) están definidos cada grado.

Los resultados obtenidos con el modelo fueron analizados cualitativamente, contrastándolos con los comportamientos esperados de la Temperatura potencial y los componentes de la dirección y velocidad de los vientos. La temperatura potencial se comparó teniendo en cuenta los mapas generados en la modelación realizada y en los boletines de predicción climática Nos 155 y 156 realizados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) [5],[6]. Los vientos serán comparados teniendo en cuenta el Atlas de vientos y energía eólica de Colombia [7].

Para el modelo de calidad de aire se hicieron 8 diferentes simulaciones variando las resoluciones de la malla y los puntos de inicio de las mismas para las simulaciones con mayor resolución, dejando los dominios centrados en la región de Bogotá y del Valle del Cauca específicamente.

Para hacer la validación de la modelación de calidad de aire, se emplearon datos medidos en estaciones de monitoreo y se compararon con los datos extraídos de las simulaciones.

El contaminante que se seleccionó para hacer la validación fue el ozono (O_3), ya que los modelos fotoquímicos están diseñados principalmente para mirar el comportamiento de contaminantes secundarios como éste en la atmósfera. Ya que no se cuentan con datos de ozono para dicho periodo en las estaciones en Bogotá se hizo la validación únicamente con los datos de las estaciones de la CVC.

Al igual que el modelo meteorológico de los resultados de las simulaciones de calidad de aire se evaluaron solamente las del mes de Enero de 2008. Todos los resultados de las simulaciones de Diciembre de 2007 se emplearon para la “estabilización” del modelo.

3.- Resultados y discusión

Se comparo cualitativamente los resultados de las simulaciones realizadas con *WRF*. Las variables comparadas fueron la temperatura potencial y la dirección y velocidad del viento todas a nivel de superficie.

La temperatura potencial simulada por el modelo mostraba como en las zonas con poca vegetación, es decir, con cobertura vegetal baja, fluctuaba más por variación y retención de calor. En la figura 1 se ilustra un ejemplo de la representación de los resultados obtenidos por el modelo.

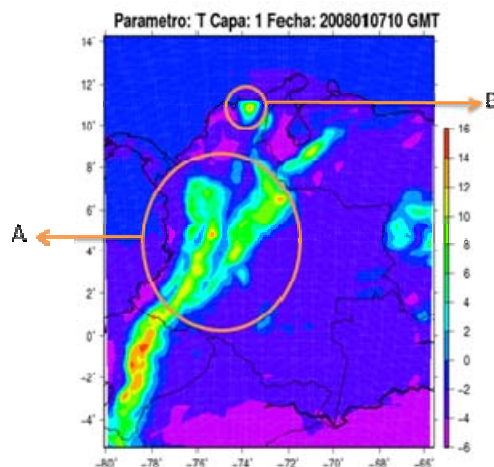


Figura. 1. Temperatura potencial. Día típico 7 de enero de 2008. 5:00 Hora Colombiana. Se aprecia claramente las cadenas montañosas en Colombia (región “A”), obteniendo los valores de mayor temperatura potencial en los picos de las montañas (Colores naranja – rojo). La Sierra Nevada de Santa Marta (región “B”).

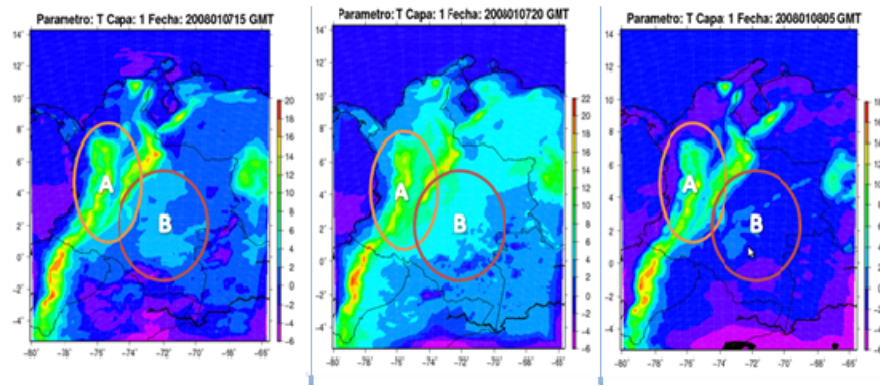


Figura 2. Temperatura potencial. Día típico 7 de enero de 2008. 10:00 ,15:00 24:00 Horas Hora Colombiana. Se aprecia como en las horas donde hay mayor radiación solar la temperatura potencial sobre el dominio de simulación es mucho más homogénea.

En la figura 2, se aprecia cómo en la zona de los llanos orientales (región “B”) se observa la mayor fluctuación en la temperatura potencial, mientras que en la zona montañosa (región “A”), con mayor cobertura vegetal, los cambios en temperatura potencial son mínimos.

Para los vientos se obtuvo en el Mar Caribe, el modelo muestra que los vientos tienen origen en el anticiclón de los azores (va en dirección manecillas de reloj). En los cuerpos de agua, el modelo representa de manera correcta los mayores valores de velocidad que en el continente, debido a que la rugosidad del agua es menor que la del suelo.

En la zona de la Sierra Nevada de Santa Marta, el modelo reproduce la esperada intensificación de vientos sobre el mar, los cuales son vientos fríos. Su origen se debe a que, durante las horas de la noche, los vientos que vienen de la parte alta de la montaña se dirigen hacia el mar. En las horas del medio día y primeras horas de la tarde, el modelo muestra que los vientos se encuentran más alejados de la, mientras que durante las horas de la noche, se encuentran más próximos a esta.

En la zona del Pacífico, los vientos simulados por el modelo van hacia el Norte, provenientes de la corriente de Humboldt, como es lo esperado. Estos vientos presentan debilitamiento sobre la pared occidental de la Cordillera Occidental.

Para el modelo de calidad de aire se efectuaron comparaciones con dos estaciones de la red de monitoreo de la CVC (Corporación del Valle del Cauca) la de Palmira y la de Yumbo. Se eligieron estas estaciones ya que por sus características [1] estas representarían mejor el comportamiento regional y no estarían influenciadas por una alta carga contaminante originada en la ciudad.

Debido a la resolución del modelo, este no diferenciaba entre las dos estaciones ya que estas se encontraban muy cercanas y las mostraba como un mismo punto. Se realizó una correlación entre los datos reportados por ambas estaciones comparando sus promedios horarios mensuales. La figura 3 muestra la comparación en la concentración de O_3 (ozono) en las dos estaciones, para todos los casos la estación de Palmira reporta valores mayores, pero el comportamiento hora a hora en ambas estaciones es similar.

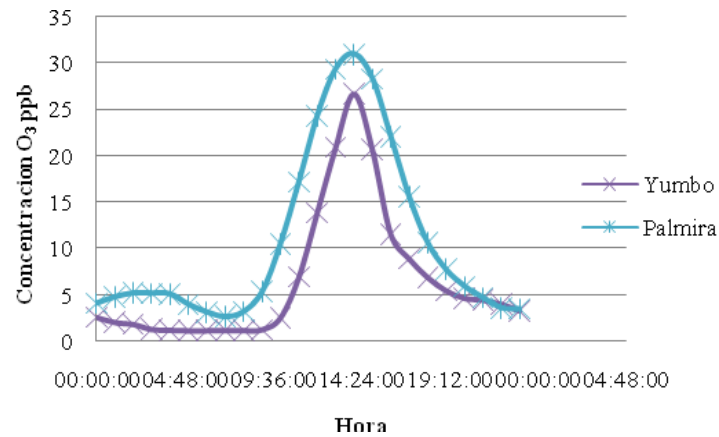


Figura. 3. Comparación del promedio horario mensual entre las estaciones de Yumbo y Palmira

Se compararon los datos arrojados por el modelo con los medidos por las estaciones. En todos los casos las concentraciones de los contaminantes primarios calculados por el modelo (NO , NO_2 y SO_2) fueron inferiores a los reportados por las estaciones. Mientras que en el caso de los contaminantes secundarios O_3 se evidencia el comportamiento contrario como se puede ver en la figura 4. Esto indica que el inventario de emisiones tomado de *EDGAR* no está teniendo en cuenta la situación específica de la zona de modelación ya que su resolución es baja.

Como se puede observar en la figura 4 existe una diferencia entre los valores calculados en el modelo dependiendo del tamaño de rejilla de la simulación, este resultado no es el

esperado, ya que en un área mayor se espera que haya una mayor dilución y, por lo tanto, una menor concentración.

La diferencia entre los valores medidos y los obtenidos a través de la simulación se pueden deber a tres diferentes causas [10]. La primera es que la concentración base de fondo definida por defecto por el modelo es muy alta. La segunda, es que por la tipología de la estación puede no estarse representando el comportamiento de la región de modelación, sino de una que esté influenciada por una estela de contaminantes. La tercera causa está asociada a errores en las mediciones efectuadas por las estaciones.

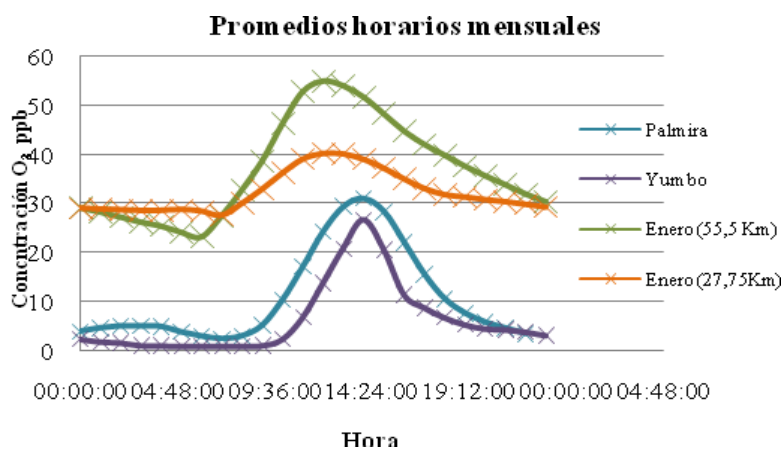


Figura. 4. Comparación del promedio horario mensual entre las estaciones de Yumbo y Palmira y los valores simulados con dos tamaños diferentes de rejilla

Si la concentración base de contaminantes es muy alta, se espera que exista una buena correlación entre los valores simulados y los medidos, es decir que la tendencia que ambas series de datos muestran sean similares y se puedan comparar usando un factor multiplicador [10].

Otra de las causas de la diferencia entre los valores de concentración de ozono obtenidas es que la estación de monitoreo este influenciada por una estela de contaminantes provenientes de una ciudad o una zona industrial cercana [10]. En este caso, la estela de contaminantes podría tener dos fuentes, una asociada a la producida en Cali y la otra asociada al gran complejo de industrias ubicadas en el Valle del Cauca. Las estelas de contaminación de las ciudades contienen a los contaminantes precursores de la formación y la destrucción de ozono y dependiendo de las proporciones de estos y de

qué tanta radiación solar haya se favorece la producción o la destrucción del mismo [9]. La concentración medida de ozono troposférico puede reducirse en zonas influenciadas por la estela de contaminantes si estos contienen NO_x , ya que concentraciones altas de este contaminante favorecen la destrucción de ozono en horas de la noche, llevándolo generalmente a valores cercanos a cero. Se puede apreciar, en la figura 4, que la concentración de ozono en horas de la noche es muy baja y la formación de ozono debido a la reacción entre sus precursores y la radiación solar no permite alcanzar valores tan elevados en su concentración como los obtenidos por el modelo, el cual parece no tener en cuenta la estela de contaminantes industriales y urbanos.

4.- Conclusiones

A través del modelo meteorológico *WRF* fue posible representar la dinámica atmosférica a mesoescala en Colombia. Los comportamientos de temperatura potencial y vientos reproducidos por el modelo son coherentes con los reportados por la literatura.

El modelo de calidad de aire representa comportamiento típico a mesoescala con concentraciones bajas de contaminantes primarios asociados a procesos antropogénicos, pero se observó que en Colombia no se encuentran estaciones de calidad de aire que midan parámetros a esta escala, los resultados obtenidos a través de la simulación no coinciden con las mediciones efectuadas.

En todos los casos los resultados de las estaciones de monitoreo mostraban como las concentraciones de los contaminantes analizados tenían el comportamiento típico del mostrado por una estación influenciada por la estela de contaminantes de una ciudad, como evidencia se tiene la baja concentración de ozono en horas de cero radiación solar y las altas concentraciones de contaminantes primarios durante el día.

El modelo *CHIMERE* podría ser empleado a menores escalas si se contara con un inventario de emisiones de mejor resolución que el de *EDGAR*, pero su uso más común es para determinar la dinámica de formación y distribución de contaminantes a mesoescala.

Referencias

- [1] Agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie (ADEME), *Classification et critères d'implantation des stations de surveillance de la qualité de l'air*, ADEME Éditions, Paris, (2002).
- [2] E. Behrentz, N. Sánchez, M. Fandiño, Parte A – *Inventario de emisiones de Fuentes fijas, Definición de elementos técnicos para la formulación de políticas distritales encaminadas al mejoramiento de la calidad de aire de Bogotá*, Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental (CIIA), Universidad de los Andes, (2008).
- [3] E. Behrentz, N. Sánchez, P. Rodriguez, Parte B – *Inventario de emisiones de Fuentes vehiculares, Definición de elementos técnicos para la formulación de políticas distritales encaminadas al mejoramiento de la calidad de aire de Bogotá*, Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental (CIIA), Universidad de los Andes, (2008).
- [4] M. García, *Modelos de Dispersión I Fundamentos teóricos*, Curso On-Line de modelización de la contaminación atmosférica. Modulo 3, Tema 1. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), (2004).
- [5] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales De Colombia (IDEAM), Boletín de predicción climática No 155, diciembre de 2007.
- [6] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales De Colombia (IDEAM), Boletín de predicción climática No 156, enero de 2008.
- [7] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales De Colombia (IDEAM), Unidad DE Planeación Minero Energética (UPME), Atlas de vientos y energía eólica de Colombia, (2006).
- [8] K. Nester, F. Fiedler, W. Wilms-Grabe, T. Zhao, Establishment of a model network and its application for the prediction of the air pollution in a mesoscale area, *Air Pollution Modeling and Its Application XIV*, Ed. Gryning and Schiermeier, Kluwer Academic, New York, (2001).
- [9] A. Stein, E. Mantilla, M. Millán, *Using measured and modeled indicators to assess ozone-NOx-VOC sensitivity in a western Mediterranean coastal environment*, Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM), Valencia, Spain, (2005).
- [10] M. Van Loon, P. Builtjes, A. Segers, *Modelling and data assimilation of ozone*, *Air Pollution Modeling and Its Application XIV*, Ed. Gryning and Schiermeier, Kluwer Academic, New York, (2001).
- [11] E. Zárate, *Understanding the Origins and Fate of Air Pollution in Bogotá, Colombia [tesis doctoral]*, Lausanne (Switzerland), École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Doctorado en Ciencias, (2007).
- [12] E. Zarate, L. Belalcázar, A. Clappier, V. Manzi, H. Van den Bergh, Air quality modelling over Bogota, Colombia: Combined techniques to estimate

and evaluate emission inventories, *Atmospheric Environment* Vol 41, Pags 6302–6318, (2007).

- [13] E. Zarate, L. Belalcázar, D. Echeverry, A. Clappier, *Air quality modeling over Bogotá city*, Air and soil pollution laboratory (LPAS) - Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), Lausanne, Switzerland, Civil and Environmental Engineering Department - Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, (2004).