

Modelos e instrumentos para estudios sobre espesor óptico de aerosoles y su relación con el forzamiento radiativo terrestre

Models and tools for studies on aerosol optical thickness and its relation to the Earth's radiative forcing

Pamela Rocío Piñas Sumalave¹

Universidad Continental
pamelasumalave@gmail.com

RESUMEN

El objetivo fue dar a conocer sobre los modelos e instrumentos necesarios para recabar, procesar e interpretar datos de los aerosoles atmosféricos y sub variables necesarias para su estudio. Así mismo del posible forzamiento radiativo que debido a las propiedades ópticas de los aerosoles generaría en la ciudad de Huancayo. Los aerosoles generados por la quema de biomasa en el Perú en un alto porcentaje provienen de la Amazonía, a esto se añade los provenientes de otros países. Entre los instrumentos disponibles en la ciudad de Huancayo para estos estudios se tiene el Fotómetro Solar CIMEL CE318 de la Red AERONET, red que cuenta con más de 450 fotómetros alrededor del mundo; este instrumento recaba información de variables como el espesor óptico de aerosoles, coeficiente de angstrom y otros. Para corroborar esta información se tiene acceso a datos proporcionados por el espectroradiómetro MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua. Los modelos atmosféricos utilizados para el procesamiento de datos de aerosoles y el forzamiento radiativo son el HYSPLIT y el SBDART. En conclusión es necesario tener consolidada la información, acerca de las variables como de los instrumentos y modelos que son necesarios e indispensables para la investigación de esta problemática que tiene su punto de origen en las quemas de biomasa, con consecuencia en la contaminación atmosférica y que finalmente perjudica a todo un entorno social y medioambiental.

Palabras clave: Aerosoles atmosféricos, forzamiento radiativo, balance de energía, contaminación atmosférica, material particulado.

ABSTRACT

The objective is to know about the needed models and tools to recover, process and interpret atmospheric aerosol data and related sub variables for its research. Also to know about the possible generated radiative forcing due to the aerosols optical properties in Huancayo. The generated aerosols by the biomass burning in Peru are in a highest percentage from the Peru's Amazon and it's added those which come from other countries. The available tools for this kind of studies In Huancayo are for example the CIMEL CE318 Solar Photometer from AERONET network, it has more than 450 worldwide photometers; this tool collects information of variables such as aerosol optical depth (AOD), angstrom coefficient and others. To corroborate this information we have the provided data by the MODIS spectroradiometer on the Terra and Aqua satellites. The used atmospheric models for aerosols data processing and the radiative forcing are the HYSPLIT and SBDART. In conclusion it is necessary to have consolidated information about variables, tools and models which are necessary and indispensable for this problem research that has its source in the biomass burning, with result in the atmospheric pollution and ultimately harms all social and environmental surroundings

Keywords: Atmospheric aerosols, radiative forcing, energy balance, atmospheric pollution, particulate matter.

Historial del artículo:

Recibido: 27 de junio de 2015. Aprobado: 2 de octubre de 2015. Disponible en línea: 30 de diciembre de 2015

¹ Bachiller en Ingeniería Ambiental de la Universidad Continental, Huancayo - Perú.

INTRODUCCIÓN

Los aerosoles generados por la quema de biomasa son una de las fuentes de contaminación atmosférica. Estudios realizados nos indican que en la región tropical la quema de vegetación es responsable de la emisión de 2 a 5×10^5 g de carbono (C) por año, mientras que la emisión de C a causa de la quema de combustible fósil es de $5,5 \times 10^5$ g de C por año (1).

Se sabe que las masas de aire se transportan desde su lugar de origen a diversos puntos, bajo la influencia de la dirección del viento y diversas variables meteorológicas. Estas masas de aire llevan consigo, junto a otras partículas, aerosoles provenientes de la quema de biomasa. Los aerosoles tienen un efecto directo e indirecto en el forzamiento radiativo; directo por la absorción y dispersión de radiación solar e indirecto cambiando las propiedades ópticas de las nubes. Por otro lado el forzamiento radiativo terrestre consiste en un cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la tierra, tenemos forzamiento radiativo positivo y negativo, el primero contribuye al calentamiento de la superficie de la tierra y el negativo favorece a su enfriamiento (2).

Para la medición de diversas variables de los aerosoles atmosféricos tenemos el fotómetro solar que mide la irradiancia solar, el Espesor Óptico de Aerosoles (EOA) y otras propiedades. La Red Aerosol Robotic Network (AERONET) emplea más de 450 fotómetros solares CIMEL CE 318 en el mundo, trabaja en coordinación con la National Aeronautic and Space Administration (NASA) y pone los datos disponibles para el usuario mediante su página web. Existen diversos métodos por los cuales se puede determinar el forzamiento radiativo, los mismos que requieren de diversos instrumentos. El nefelómetro y aefelómetro son dos de los principales instrumentos, ya que determinan la dispersión y la absorción de la radiación respectivamente, sin embargo de no contar con ellos existen otras metodologías que pueden ser aplicadas.

Para completar la investigación se requieren de modelos atmosféricos para el procesamiento y análisis de los datos, en el presente artículo detallaremos un modelo para el estudio del transporte de aerosoles (modelo HYSPLIT) y un modelo para el estudio del forzamiento radiativo (modelo SB DART).

Definiciones básicas

Aerosoles

Se definen como un grupo de partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire con tamaños promedios que oscilan entre $0,01$ a $10 \mu\text{m}$, que pueden permanecer en la atmósfera durante al menos unas horas (3). El estudio de los aerosoles en la

atmósfera va desde los procesos básicos de interacción con radiación solar, el forzamiento radiativo hasta el análisis de su impacto climático y los problemas de contaminación atmosférica (4).

Los aerosoles atmosféricos pueden ser clasificados como:

- Naturales: Compuestos por cenizas volcánicas, sal marina, polvo desértico, esporas, polen, entre otros.
- Antropogénicos: Hollín, partículas minerales generadas por procesos industriales y naturales, partículas producidas a partir de contaminantes gaseosos, quemados de biomasa, etc.

Los aerosoles pueden influir en el clima de dos formas diferentes, estas son: directamente (por dispersión y absorción de la radiación) e indirectamente (actuando como núcleos de condensación en la formación de nubes o modificando sus propiedades ópticas y tiempo de vida). La influencia de los aerosoles en el forzamiento radiativo se debe a la absorción y dispersión de la radiación solar que incide en ellos, además cabe mencionar que el efecto de los aerosoles sobre la radiación es diferente para cada región espectral y está íntimamente ligado a las características de estos (5), por lo que un factor determinante para su estudio es la capa de la atmósfera en la cual se encuentran ya sea troposfera o estratosfera. En la troposfera varían significativamente en cantidad y composición por regiones, tienen tiempos de vida muy cortos que oscilan entre unos minutos hasta unas semanas, debido a los procesos físico-químicos y dinámicos que tienen lugar en esta región de la atmósfera y a la gran variedad de tamaños de partículas y composición química de los mismos. Por su parte en la estratosfera predominan procesos dinámicos horizontales y debido a ello el tiempo de vida de los aerosoles es mayor (hasta de 2 años) además, presentan mayor homogeneidad química y espacial (6).

Dispersión

La dispersión está en función de la relación que existe entre el radio de la partícula y la longitud de onda de la radiación incidente. Es decir si el radio de la partícula supera o se aproxima a la longitud de onda, aumenta la probabilidad de dispersión de la radiación en dirección del haz incidente y la retrodispersión disminuye, a esta probabilidad se le denomina función fase y nos permite caracterizar a los aerosoles al tomar diversos valores de acuerdo al tamaño de la partícula y la longitud de onda de la radiación que incide sobre ella. Esta función se encuentra normalizada a 1 (5). Para la caracterización de los aerosoles se emplea también el factor de asimetría, el cual considera que la dispersión es hacia adelante cuando este es igual a la unidad, hacia atrás cuando es menor a la unidad

y dispersión isotrópica Rayleigh (dispersión igual en todos los ángulos) cuando este valor es 0 (7). Las otras 2 propiedades son el albedo de simple dispersión y el coeficiente de extinción.

Absorción

Es un proceso selectivo que depende de la presencia de las especies absorbentes y de sus bandas de absorción. En la atmósfera existen 12 gases permanentes y un grupo de gases de concentración variable de los cuales las especies principales de absorción, tanto en el espectro solar como en el infrarrojo, son: el vapor de agua, el dióxido y monóxido de carbono, el ozono, el monóxido de dinitrogeno, el oxígeno, el metano y el nitrógeno. Otros absorbentes, aunque en menor medida, son los óxidos de nitrógeno y las combinaciones de hidrocarburos (8).

Coefficiente de Angstrom

Coefficiente que caracteriza la cantidad de aerosoles en la vertical de un lugar, es el correspondiente a la longitud de onda de un micrómetro y, por lo general, está comprendido entre 0,02 (cielo claro) y 0,20 (cielo contaminado), sirve para describir la dependencia espectral del espesor óptico de los aerosoles. Angstrom (1929 - 1964) propuso una expresión parametrizada, válida para un cierto rango espectral, que es:

$$\tau_a = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}$$

Donde: λ es la longitud de onda en μm , α el parámetro o exponente de Angstrom (relacionado con el tamaño de aerosol) y β es una constante con el espesor óptico correspondiente a 1 μm .

Teóricamente el parámetro alfa puede tomar valores entre 0 y 4. Los valores mas bajos se asocian a partículas grandes, en las que la extinción no tiene dependencia espectral. Para los aerosoles lo habitual es que alfa varíe entre 0 y 2,5 (4).

Forzamiento radiativo

Es el cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la tierra medido en el borde superior de la troposfera (a 12 000 m s.n.m. aproximadamente) como resultado de cambios internos en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte externo de energía solar, expresado en W/m^2 . El IPCC lo define como "un cambio en la irradiancia neta vertical en la tropopausa debido a un cambio interno o un cambio en el forzamiento externo del sistema climático (por ejemplo, un cambio en la concentración de dióxido de carbono o la potencia del Sol). Normalmente este es calculado después de permitir que las temperaturas estratosféricas se reajusten al equilibrio radiativo, pero manteniendo fijas todas las propiedades troposféricas

en sus valores sin perturbaciones" (3). El forzamiento puede ser calculado en los campos atmosféricos que no están afectados por el forzamiento radiativo de aerosoles o considerando la respuesta climática al forzamiento, cabe mencionar que es necesario el cálculo de la perturbación y la no perturbación de los flujos radiativos o las tasas de calentamiento en el mismo campo atmosférico (9).

El forzamiento radiativo por aerosoles, es por lo tanto, una perturbación en las tasas de calentamiento radiativo atmosférico y los flujos de radiación de onda larga neta en la superficie, causada por la presencia de los aerosoles.

En uno de los informes presentados por el IPCC se manifiesta que los modelos, comparaciones y simulaciones de datos indican que la absorción de los aerosoles, específicamente el carbono negro, puede reducir la radiación solar que llega a la superficie y puede calentar la atmosfera a escala regional, afectando así al perfil de temperatura vertical y a la circulación atmosférica a gran escala (2).

Dentro de los agentes de forzamiento se pueden considerar gases como el vapor de agua, gases contaminantes (COV, NOx y otros), así como los aerosoles (carbonilla, polvo, ceniza, etc.).

Instrumentos de medición

Fotómetro Solar CIMEL CE318

Los fotómetros solares CIMEL CE318 son aquellos empleados por AERONET y es coordinada por la NASA. Inicia sus operaciones en 1998 con la finalidad de complementar las medidas de satélites de diferentes agencias internacionales, está conformada por más de 450 estaciones alrededor del mundo cuya función es la de coordinar y mejorar las medidas de aerosoles desde superficie. Esta red, constituida por subredes federadas a AERONET, ofrece una base de datos continua de dominio público y de fácil acceso, sobre espesor óptico por aerosoles, microfísica y propiedades radiativas, para la investigación de los aerosoles y su caracterización.

Estos fotómetros realizan una caracterización de los aerosoles en la columna atmosférica, derivado del EOA en 340, 380, 440, 500, 670, 870 y 1200 nm. Luego de utilizar un algoritmo de inversión se obtienen las diversas propiedades de los aerosoles.

Los datos que proporciona AERONET se agrupan en 3 niveles de calidad, estos son:

- Datos de nivel 1.0: Aquellos datos que no han sido revisados ni filtrados, es decir aquellos obtenidos sin ninguna modificación.

- Datos de nivel 1.5: En este nivel los datos son sometidos al filtrado de datos con nubes.
- Datos de nivel 2.0: Estos datos ya han sido filtrados por nubes y además pasan por un control de calidad ya que se les ha aplicado un proceso de postcalibración.

El fotómetro solar CIMEL CE318 es un instrumento diseñado para la medida autónoma y automática de la irradiancia solar directa y de cielo, en el plano almucantar y principal. En modo automático las medidas de irradiancia solar directa se realizan cada 15 minutos y es a través de estas medidas que se puede extraer el espesor óptico de aerosoles y el vapor de agua. Para la obtención del espesor óptico se recurre a la Ley de Lambert-Beer, ya que según esta, el espesor óptico total se obtiene a través del flujo solar directo a nivel del suelo y el flujo extraterrestre.

La selección de las longitudes de onda con las que



Figura N° 1: Fotómetro CIMEL CE318.

Fuente: Universo Blog. <https://josevicentediaz.wordpress.com/teledeteccion/fotometro-solar-cimel-ce318/>

mede este instrumento se realiza por medio de filtros interferenciales insertados en una rueda de filtros de nueve posiciones. Entonces las longitudes de onda para las medidas de espesor óptico de aerosoles son: 440, 670, 870, 1020 nm con el canal extra de 940 nm para la determinación del contenido total de vapor de agua precipitable.

Cabe mencionar que a través de las medidas del fotómetro solar se pueden obtener otras características de los aerosoles tales como las distribuciones de tamaño y otras propiedades.

En el Observatorio de Huancayo - Perú del Instituto Geofísico del Perú (IGP) fue instalado el 19 de marzo de 2015 un Fotómetro solar CIMEL CE-318, los datos que se obtienen son enviados y procesados en tiempo real en los servidores de la NASA.

MODIS

(Moderate and Resolution Imaging Spectroradiometer)

Espectroradiómetro de imágenes de media resolución, instrumento científico lanzado en órbita terrestre a bordo del satélite Terra (EOA AM) en diciembre de 1999, y en mayo de 2002 a bordo del satélite Aqua (EOS PM).

El satélite Terra empezó a proporcionar imágenes a partir de febrero del 2000, este va de norte a sur a través del ecuador a las 10:30 de la mañana (órbita descendente con altitud media a 708 km) y Aqua que ha proporcionado imágenes a partir de junio del 2002 va de sur a norte sobre el ecuador a las 13:30 de la tarde (órbita ascendente) por lo que ambos satélites tienen una visión completa de la tierra en el plazo de uno a dos días dando una vuelta a la tierra en 90 min aproximadamente, realizando 16 órbitas por día. La órbita va cambiando cada día pero se repite cada 16 días.

Los datos que nos brinda provee medidas en gran escala de la dinámica global, cambios en la cobertura de nubes, procesos que ocurren en la tierra, océanos y en la atmósfera más baja (10).

Consta de un sistema óptico con un telescopio a focal formado por dos espejos fuera de eje, que dirige la energía a 4 objetivos de refracción, uno para cada una de las regiones espectrales VIS (visible), NIR (infrarrojo cercano), SWIR/MWIR (infrarrojo cercano de onda corta y media) y LWIR (infrarrojo de onda larga) para cubrir un rango espectral total de 0,4 a 14,4 μm .

Las especificaciones del instrumento MODIS indican una alta sensibilidad radiométrica (12 bits) en 36 bandas espectrales que van desde el visible al infrarrojo térmico (0,415 – 14,235 μm). Las primeras 19 bandas abarcan la región del espectro electromagnético situada entre 0,405 y 2,155 μm , mientras que las bandas de la 20 a la 36 cubren la parte del infrarrojo térmico del espectro, de 3,660 a 14,385 μm . Las bandas 1 y 2 crean imágenes con una resolución espacial de 250 m en el nadir, 500 m (bandas 3 – 7) y 1000 m (bandas 8 – 36). Las 7 primeras bandas de las 36 (0,47; 0,55; 0,66; 0,86; 1,21; 1,64; 2,13 μm) son las que se utilizan para obtener productos de aerosoles.

Modelos atmosféricos para estudios de aerosoles atmosféricos y forzamiento radiativo

Modelo HYSPLIT

El modelo Hybrid Single-Particle Lagrangian

Integrated Trajectory (HYSPPLIT) fue desarrollado en 1982 por Ronald Draxler de la Administración Nacional de Océanos y Atmósfera (NOAA), en este se puede observar el transporte y dispersión de los contaminantes que se originan en una variedad de fuentes. Se considera un modelo híbrido ya que tiene como referencia, modelos Lagrangianos y Eulerianos, realizando cálculos de advección y de difusión del aire, así como, cálculos de concentraciones del sistema. Este modelo es un sistema completo para calcular a partir de una simple trayectoria, complejas simulaciones de dispersión y depósitos, utilizando las aproximaciones a una partícula o a una agrupación de estas (11, 12, 13, 14).

Este modelo fue lanzado en 1998, hasta la actualidad se cuentan con 4 versiones. La primera utilizaba datos crudos y medidas de dispersión tomadas solamente durante el día, la segunda versión introdujo una variable de la fuerza con la que el aire se mezcla que se basa en un perfil de difusión variando el tiempo y el espacio, para la tercera versión los datos de observaciones generales fueron sustituidos por datos meteorológicos provenientes de análisis o pronósticos a corto plazo y en su cuarta versión en base a un algoritmo, considera la dispersión de nubes en el eje horizontal y la dispersión de las partículas en el vertical (15).

El modelo además es capaz de manejar campos de datos meteorológicos proporcionando diferentes sistemas de coordenadas dado que éstos son linealmente interpolados a un modelo de dispersión interna. El sistema de rejilla para este modelo está diseñado en función de los datos meteorológicos, buscando su similitud y logrando que sean idénticos para poder aplicar los mapas de proyección, es necesario además que estos datos se den a intervalos fijos (16, 17).

Modelo SBDART

Por sus siglas en inglés Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer (SBDART) es un modelo numérico que simula los procesos físicos que tienen lugar en la atmósfera. Fue desarrollado por la Universidad de California Santa Barbara, de ahí el nombre. Utiliza los cálculos basados en la ecuación de transferencia radiativa para planos paralelos. Simula la interacción de los diferentes gases que existen en la atmósfera con la radiación en diferentes longitudes de onda, desde el espectro que comprende la radiación emitida por el sol hasta aquella parte del espectro emitida por cuerpos negros con temperaturas cercanas a la de la tierra.

Este modelo realiza cálculos basándose principalmente en los perfiles de presión, temperatura, cantidad de humedad y ozono en la atmósfera. Adicionalmente se

Tabla N° 1: Variables de entrada al modelo SB DART.

Tipo	Variable	Unidad
Atmósfera (necesario)	Presión	hPa
	Temperatura	K
	Humedad	g/m ³
	Ozono	g/m ³
Nubes (opcional)	LWP, IWP	g/m ²
	r _e (radio efectivo)	μm
	Cobertura nubosa	%
Otros (Opcional)	Aerosoles	g/m ²
	Dióxido de carbono	μm
	Metano	%

pueden agregar otros parámetros como cantidad de dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) (18).

Variables de entrada: Este modelo considera el vapor de agua, el ozono, dióxido de carbono y metano (al ser los gases que interactúan principalmente con las radiaciones de onda corta y larga) tomando en cuenta la presión, temperatura y altura a la que se encuentran dichos elementos. En la tabla 1 se muestran las variables principales y opcionales:

CONCLUSIONES

Para conocer los efectos de los aerosoles sobre el forzamiento radiativo se debe determinar las propiedades ópticas de los mismos, además de conocer las épocas donde estos aerosoles, transportados por el viento, incrementan su concentración. En el caso de los aerosoles generados por la quema de biomasa estos incrementan su concentración en la época de sequía, comprendida entre los meses de junio a noviembre para el caso particular de Huancayo. Es necesario considerar esto para la realización de investigaciones en esta materia.

Para dar inicio a este tipo de investigación se debe de tener un adecuado manejo de los datos y su procesamiento, es decir, la utilización de los instrumentos y modelos que son finalmente los que brindarán los resultados para conocer la influencia de los aerosoles en el forzamiento radiativo terrestre.

El forzamiento radiativo por aerosoles continúa siendo en la actualidad uno de los puntos de incertidumbre respecto a la predicción del clima debido a la escasez de estudios que especifiquen y predigan sus efectos.

La utilización de modelos atmosféricos son indispensables para el entendimiento del forzamiento radiativo a causa de los aerosoles. Se tienen modelos

de gran, mediana y pequeña escala, lo que dependerá del tipo de datos que se tengan y utilicen. Medidas globales adquiridas a través de satélites bien definidos pueden ser utilizados para modelos de gran escala, por otro lado se pueden utilizar datos primarios y específicos en pequeña escala para entender procesos tales como la relación nube-aerosoles.

Agradecimiento

A la Dirección de Investigación de la Universidad Continental en Huancayo - Perú por la asesoría académica, al Concejo Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) por el financiamiento de este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Crutzen P, Lelieveld J. Human impacts on atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. *Science*. 1997; 276(5315): 1052-1058.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change [Internet]: IPCC; [citado el 15 de junio de 2015]. Forzamiento radiativo neto mundial, potenciales de calentamiento mundial y pautas de forzamiento. Disponible en: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-2-5.html
3. Intergovernmental Panel on Climate Change [Internet]: IPCC; [citado el 18 de junio de 2015]. Cuarto informe Glosario de términos. Disponible en: http://www.ciiifen.org/index.php?option=com_content&view=article&id=519%3Aglosario-ipcc&catid=69%3Aclima-cambioclimatico&Itemid=83&lang=es.
4. Olmeda CT. Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación "El Arenosillo" de la red AERONET. [Tesis doctoral]. Valladolid: Universidad de Valladolid; 2005.
5. Díaz AM. Caracterización de los aerosoles atmosféricos y su influencia en los niveles de radiación UV en la región Canarias. [Tesis doctoral]. España: Universidad de la Laguna; 2006.
6. Estevan R. Efecto radiativo de la nube de aerosoles del Monte Pinatubo sobre el Gran Caribe. [Tesis doctoral]. La Habana: Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba; 2009.
7. Sobrino J. Teledetección. Valencia: AEI; 2001.
8. Torres N. Determinación del coeficiente de turbiedad atmosférica en todo el ancho de banda espectro solar para la localidad de Chapinero. Bogotá; 2013.
9. Stenchikov GL, Kirchner I, Robock A, Graf HF, et al. Radiative forcing from the 1991 Mount Pinatubo volcanic eruption. *Atmospheres*. 1998; 103(D12): 13837-13857.
10. NASA [Internet]. MODIS; [citado el 05 de junio de 2015]. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer [aprox. 1 pantalla]. Disponible en: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>.
11. NOAA [Internet]. Maryland: Air Resources Laboratory; [citado el 05 de junio de 2015]. Advancing Atmospheric Science and Technology Through Research. [aprox. 1 pantalla]. Disponible en: www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_info.php.
12. Draxler RR, Hess GD. Description of the HYSPLIT_4 modeling system. Silver Maryland: NOAA; 1997. Tech. Memo. ERL ARL-224.
13. Draxler RR, Hess G.D. An overview of the HYSPLIT_4 Modeling System for Trajectories, Dispersion and Deposition. *Australian Meteorological Magazine*. 1998; 47: 295-308.
14. Draxler RR. HYSPLIT_4 USER'S GUIDE. Maryland: NOAA; 1999. Technical Memorandum ERL ARL-230.
15. Moreno SF, Ramirez LE. Aplicación del modelo HYSPLIT para evaluar las trayectorias del aire y su impacto en la dispersión de contaminantes atmosféricos. Congreso Regional de QFB. México: Universidad Autónoma de Nuevo León; 2007.
16. NOAA [Internet]. Maryland: Air Resources Laboratory; Jun 11 [citado el 15 de junio de 2015]. HYSPLIT - Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model [about 1 screen]. Disponible en: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.
17. NOAA [Internet]. Maryland: Air Resources Laboratory; Jun 6 [citado el 15 de junio de 2015]. Real Time Environmental Applications and Display System. Silver Spring MD [about 1 screen]. Disponible en: <http://ready.arl.noaa.gov>.
18. Saavedra M. Caracterización Física de Heladas Radiativas en el Valle del Mantaro. [Tesis de pregrado]. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos; 2013.