



ANÁLISIS DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOL DEBIDO A INCENDIOS FORESTALES EN LA AMAZONIA DE PERÚ, ECUADOR, COLOMBIA, BRASIL Y BOLIVIA

Optical Aerosol Thickness Analysis Due To Forest Fires In The Amazonia Of Peru, Ecuador, Colombia, Brazil And Bolivia

 ¹Alicia Gisell Rocha Condor*

 ²Jony Huacho Chavez

¹ Universidad Alas Peruanas, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Huancayo, Perú.

² Universidad Cesa Vallejo, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Lima, Perú.

*alicia.rocha.condor@hotmail.com

RESUMEN

La presente investigación aplicó el modelo lagrangiano Hysplit con el objetivo de evaluar la presencia de aerosoles atmosféricos en la ciudad de Huancayo y determinar su relación con los incendios forestales generados en las regiones amazónicas de Ecuador, Colombia, Brasil y Bolivia. La metodología consistió en la obtención de datos de AOD provenientes del fotómetro solar Cimel CE-318T que se encuentra instalado en el Observatorio de Huancayo (Perú), los datos de incendios forestales en la Amazonia se descargaron del INPE – Brasil para el periodo 2018-2019. El modelo Hysplit permitió determinar la trayectoria y dispersión de las masas de aire provenientes de la Amazonia, con la finalidad de plantear estrategias para el monitoreo de aerosoles atmosféricos. Los resultados obtenidos muestran un incremento de AOD en los meses de Agosto y Septiembre del año 2019 con valores de [0.01 – 1.06] en la ciudad de Huancayo, demostrándose que si está siendo influenciada por los aerosoles atmosféricos debido a incendios forestales generados en las regiones amazónicas de Bolivia y Brasil. Para la validación de resultados se aplicó un conjunto de indicadores estadísticos.

Palabras claves: AOD, modelo Lagrangiano, Hysplit, Fotómetro, Huancayo, INPE

ABSTRACT

This research applied the Hysplit Lagrangian model to evaluate the presence of atmospheric aerosols in the city of Huancayo and to determine their relationship with forest fires in the Amazon regions of Ecuador, Colombia, Brazil and Bolivia. The methodology involved AOD data from the Cimel CE-318T sun photometer installed at the Huancayo Observatory (Peru), forest fire data in the Amazon were downloaded from INPE - Brazil for the period 2018-2019. The Hysplit model made it possible to determine the trajectory and dispersion of air masses coming from the Amazon, in order to propose strategies for monitoring atmospheric aerosols. The results obtained show an increase in AOD in the months of August and September 2019 with values of [0.01 - 1.06] in the city of Huancayo, demonstrating that it is being influenced by atmospheric aerosols due to forest fires generated in the Amazon regions of Bolivia and Brazil. A set of statistical indicators was applied to validate the results.

Keywords: AOD, Lagrangian model, Hysplit, Photometer, Huancayo, INPE

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el estudio de la contaminación atmosférica es uno de los temas más importantes y esto se debe al gran impacto mundial que esta tiene sobre el cambio climático, la salud y la toma de decisiones respecto a cuestiones políticas y económicas (1). Según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), la superficie de la tierra se está calentando a causa del aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (2), originado como consecuencia de las actividades humanas; como la quema de combustibles fósiles, quema de vegetación y deforestación (3). Los incendios forestales en la actualidad constituyen un problema ambiental ya que provoca la pérdida de ecosistemas, flora y fauna, reducción de áreas boscosas e incluso la pérdida de vidas humanas (4). La quema de Biomasa es una fuente significativa de partículas y gases en la atmósfera (5), siendo responsable de la emisión de gases como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y aerosoles atmosféricos (6). Según el IPCC [2] los aerosoles atmosféricos son un conjunto de partículas sólidas y líquidas presentes en el aire, y cuyo tamaño oscila entre 0.01 y 100 micrómetros (7). Los aerosoles atmosféricos influyen en el clima a través de dos efectos; el denominado efecto directo está relacionado con la absorción y dispersión de radiación solar, mientras que el efecto indirecto está relacionado con la formación de núcleos de condensación de nubes (8). La quema de vegetación en la región Amazónica es una de las principales fuentes de emisión de aerosoles atmosféricos además de ser un factor muy importante en la alteración de la calidad del aire, ya que los contaminantes emitidos son transportados a miles de kilómetros (9).

El Instituto Nacional de Investigación Espacial de Brasil (INPE) estima que, durante el mes de agosto del 2019, 2.5 millones de hectáreas de ecosistema se quemaron. En el Perú, un gran porcentaje de los aerosoles atmosféricos provienen de la Amazonía, siendo su principal fuente de origen la quema de biomasa, a esto se incluye los provenientes de otros países como Brasil y Bolivia (10). Además, este aumento coincide con el inicio de incendios, generados por los agricultores en la región amazónica para la limpieza y preparación de sus terrenos agrícolas (11), otras causas para la quema de vegetación es

la transformación del uso de suelo provocado por el crecimiento urbano, demanda de productos alimenticios y deforestación (12).

En la amazonia del Perú y en la región Andina, se han evidenciado el transporte de contaminantes, entre ellos los aerosoles atmosféricos originados por quemas de biomasa provenientes de la Amazonia de Brasil, es decir, la presencia de aerosoles en la región también proviene del transporte de contaminantes de la región amazónica (9). Uno de los factores importantes para determinar la calidad del aire en la ciudad de Huancayo, es el posible transporte de contaminantes desde la Amazonia, ya que Huancayo está en la línea de corrientes de aire que transportan los contaminantes desde la región amazónica, principalmente la de Brasil. El aumento de aerosoles tiene una gran importancia en la contaminación del aire de la ciudad de Huancayo ya que interviene de manera directa e indirecta en el balance de radiación atmosférica donde puede tener efectos considerables sobre el clima terrestre a varias escalas (13). A pesar de los daños que causa la quema de biomasa, recientemente se han comenzado analizar sus impactos atmosféricos y el transporte de contaminantes en Sudamérica (14). Por lo que el presente trabajo tiene por objetivo estudiar los aerosoles atmosféricos en la ciudad de Huancayo, y el incremento de este debido al posible transporte de Partícula (Hysplit) desarrollado por el laboratorio de recursos aéreos de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), este modelo estima la trayectoria adelantada y/o retrasada de las masas de aire. Este análisis nos permitirá determinar los orígenes y fuentes de los contaminantes, los mismos que resultaran necesarios para pronosticar la calidad del aire (15). Con la obtención de las trayectorias de las masas de aire se pretende determinar las zonas del Perú que estarían siendo afectadas por los aerosoles atmosféricos provenientes de la Amazonia, esto con la finalidad de implementar e instalar una red de monitoreo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Sitio y localización

El área de estudio de la investigación comprende las regiones amazónicas de Ecuador, Colombia, Brasil y Bolivia. El punto de referencia es el observatorio del Instituto Geofísico del Perú

- Huancayo (Fig. 1) donde se encuentra instalado el fotómetro solar Cimel CE 318T. Este se encuentra ubicada a $12^{\circ}02'18''S$, $75^{\circ}19'22''W$ y 3350 msnm. En los alrededores de la estación no existen fuentes antropogénicas importantes de contaminantes (16) y la misma está rodeada de áreas rurales y agrícolas (17).

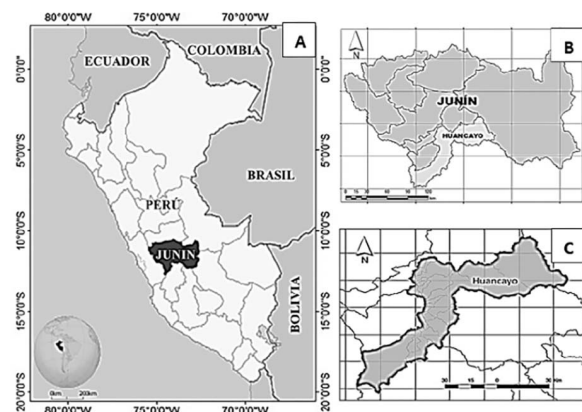


Figura 1. (A) Mapa Región Amazónica del territorio Peruano, Ecuatoriano, Colombiano, Brasileño y Boliviano. (B) Región Junín. (C) Ciudad de Huancayo.

2.2 Fotómetro solar CIMEL CE-318T

El fotómetro solar Cimel CE-318T se encuentra instalado en el Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR) del observatorio de Huancayo del Instituto Geofísico del Perú (IGP), desde el 20 de marzo del 2015, esto como parte del programa Aerosol Robotic Network (AERONET) de la National Aeronautic Space (NASA). Es un instrumento diseñado para realizar mediciones directas de radiación solar de forma automática, estas mediciones se realizan en 8 longitudes de onda 340, 380, 440, 500, 670, 870, 940, y 1020 nm, con mediciones cada 15 minutos, y permite calcular el espesor óptico de aerosol (AOD) a partir de la atenuación de la radiación solar directa medida en cada longitud de onda y calculada según la ley de Lambert Beer–Bouguer. Los datos a cada hora son transmitidos a satélites y retransmitidos para la central de control en la NASA, donde son procesadas y habilitadas para los usuarios en internet (18). Los datos de AOD se calculan para tres niveles de calidad: nivel 1.0 (datos obtenidos sin alguna modificación), nivel 1.5 (datos filtrados inicialmente, pero es posible que no se aplique la calibración final) y nivel 2.0 (calibración aplicada antes y después del campo), por lo que para la presente investigación se trabajó con datos del nivel 2.0. La calibración del equipo está a cargo de Goddard Space Flight Center (GSFC) de la NASA y son responsables de

mantener la calidad y funcionamientos de los instrumentos, la calibración al fotómetro solar se realiza de 6 a 12 meses después de recopilar datos. El fotómetro solar se calibra mediante la técnica de Langley, con el que se busca determinar el coeficiente de calibración para convertir el número digital de salida del instrumento en una salida deseada para los datos de AOD, agua precipitable y radiancia.

2.3 Focos de calor

Los datos de focos de incendios forestales se obtuvieron del INPE (<http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal>). El INPE realiza un monitoreo activo de incendios forestales que son localizados por satélites (19). Se tomaron datos de focos de calor para los años 2018 y 2019 registrados por el satélite Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a bordo de sus satélites Aqua y Terra.

2.4 Modelo de dispersión atmosférica Lagrangiana

Los modelos de difusión atmosférica hoy en día

son una de las soluciones más exactas y eficientes en el análisis del comportamiento de los contaminantes presentes en la atmósfera, su desarrollo y planteamiento general consiste en aplicar un modelo matemático para describir todas las variaciones que experimentan los contaminantes en su paso por la atmósfera, y sumar todas las contribuciones de ellas en una ecuación de balance, basados principalmente en la entrada de datos meteorológicos, información de la fuente emisora, topografía, uso de tierras, etc. (20).

Los modelos Lagrangianos matemáticamente persiguen la contaminación de un penacho en parcelas y/o partículas (Fig. 2), de esta manera, modelan el movimiento de las partículas como un desplazamiento de trayectoria aleatoria (21). El modelo Lagrangiano estima la dispersión de contaminantes en el aire calculando la estadística de la trayectoria de un número de partículas centrándose en la teoría estadística de la difusión turbulenta propuesta por Taylor, cuyo sistema de referencia es móvil y acompaña a un elemento de fluido en su trayectoria (22).

La expresión Lagrangiana se basa en una función de densidad de la probabilidad de transición, la misma que representa la probabilidad de que; si el elemento de contaminante está en un tiempo, se desplace hasta en el instante como se muestra en la ecuación 1:

$$t(Q(\vec{x}, t | \vec{x}', t')) \quad (1)$$

Teniendo en cuenta la distribución inicial del elemento como el aporte de los focos emisores. Se tiene la siguiente ecuación fundamental de la dispersión Lagrangiana:

$$\bar{c}(\vec{x}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(\vec{x}, t | \vec{x}_0, t_0) c(\vec{x}_0, t_0) d\vec{x}_0 + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{t_0}^t Q(\vec{x}, t | \vec{x}_0', t') S(\vec{x}', t') dt' d\vec{x}' \quad (2)$$

Si se supone una turbulencia estacionaria y homogénea, la probabilidad de transición de una partícula depende específicamente de los desplazamientos en el tiempo y en el espacio, y no de donde o cuando la partícula fue introducida en la corriente; es decir:

$$Q(\vec{x}, t | \vec{x}', t') = Q(\vec{x} - \vec{x}', t - t') \quad (3)$$

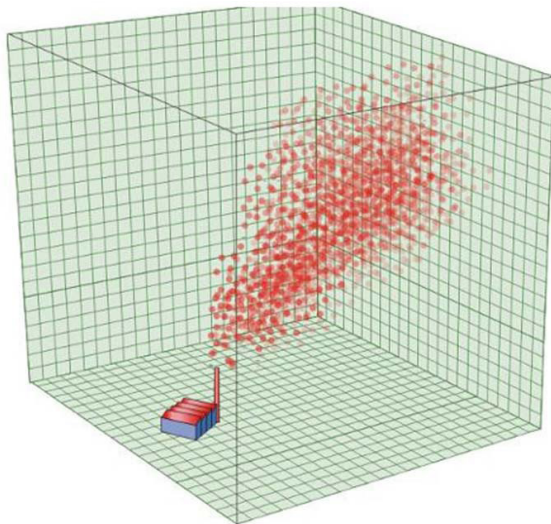


Figura 2. Diagrama de partículas de un modelo de dispersión Lagrangiano (Adaptado de [21]).

En los modelos Lagrangianos se distinguen dos sistemas de coordenadas: fijo; se da en el foco emisor, para el movimiento general al que tienen lugar los contaminantes y móvil; el cual se des- plaza con el penacho, para la descripción de la dispersión turbulenta en su interior. Las emisiones, reacciones, deposición y mezcla de contaminantes son analizadas para un volumen de aire que constantemente va cambiando de posición, esto principalmente en función a la velocidad y dirección del viento (23).

Entre los modelos de trayectoria más usados está el Hysplit, (24) el cual se aplicó en el desarrollo del presente trabajo.

2.4.1 Modelo Hysplit

Hysplit es un servicio del laboratorio de recursos atmosféricos desarrollado por la NOAA, y es uno de los más utilizados para realizar cálculos de trayectoria atmosférica y dispersión de contaminantes en el aire (15), también describe la deposición de contaminantes y materiales peligrosos. Además hace un seguimiento y pronóstico de contaminantes de diversas fuentes de emisiones estacionarias y móviles (21).

El sistema Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) proporciona un portal “cuasi operativo” para que los usuarios ejecuten el modelo de dispersión y transporte atmosférico Hysplit y las herramientas para interpretar los resultados. Las aplicaciones de usuario típicas incluyen emergencias atmosféricas o ejercicios asociados con la liberación de mate- riales peligrosos, humo de grandes incendios, calidad del aire, caída de ceniza de erupciones volcánicas y diversos estudios climatológicos. Los usuarios del sitio web READY pueden producir trayectorias de masas de aire que mueven una sola partícula lagrangiana de acuerdo con el viento medio (sin incluir la turbulencia) definido por modelos meteorológicos operativos.

Los usuarios también pueden modelar la dispersión de contaminantes con Hysplit rastreando miles de partículas lagrangianas a través de un dominio del modelo que incluye turbulencia, a diferencia de una partícula como es el caso de una sola trayectoria. De esta manera, se pueden producir penachos contaminantes a partir de fuentes tales como incendios forestales, emisiones químicas o radiológicas o erupciones volcánicas (25).

III. RESULTADOS

3.1 Focos de incendios forestales

En Brasil existe un sistema de monitoreo continuo de incendios forestales, estos datos son registrados de forma diaria, mensual y anual del mismo modo registra la ubicación geográfica de estos dentro del territorio Sudamericano. En la Figura 3 se observa la distribución espacial de los focos de incendios forestales detectados en el área de estudio donde cada punto negro en el mapa representa un foco de incendio detectado por el satélite MODIS en los años (A) 2018 y (B) 2019 respectivamente. Podemos observar que hubo un incremento significativo en el año 2019

con respecto al año 2018. Es importante destacar que en Perú el mayor número de focos de incendios se centra a lo largo de la sierra Peruana. Brasil y Bolivia presentan un mayor número de focos de incendios forestales mientras que en Ecuador y Colombia son menores. También es

importante resaltar que en el mes de septiembre del año 2019 se registró un valor máximo de 53 234 focos de calor en Brasil lo cual coincide con el incendio generado en la Amazonia de Brasil durante ese año.

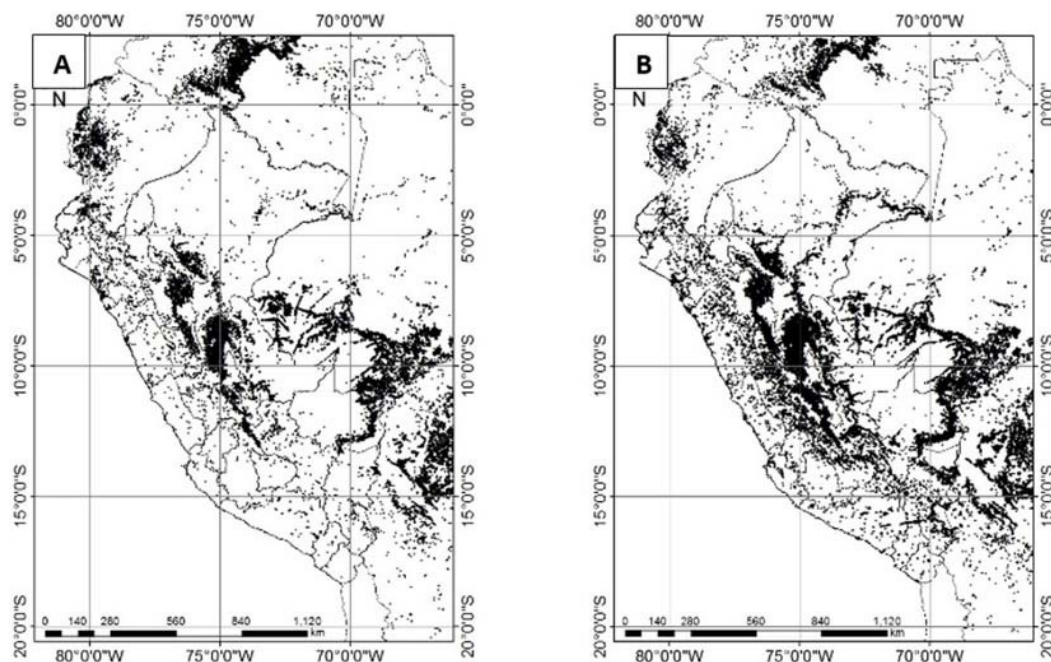


Figura 3. Mapa de focos de incendios forestales registrados en las regiones de estudio (A) 2018 y (B) 2019 del sistema de detección MODIS del INPE.

La Tabla 1, fue elaborada a partir de los datos mensuales de focos de incendios forestales en Perú, Ecuador, Colombia, Brasil y Bolivia para los años 2018 y 2019. Estos muestran la evolución mensual de la quema de biomasa, observándose que existe un pico máximo de incendios forestales en el mes de septiembre de cada año.

Meses	2018					2019				
	Bolivia	Brasil	Colombia	Ecuador	Perú	Bolivia	Brasil	Colombia	Ecuador	Perú
Enero	166	2553	1486	98	202	286	4030	1545	23	85
Febrero	71	1476	9007	33	158	230	2865	5353	20	30
Marzo	139	2659	3814	21	45	206	5213	3860	32	45
Abril	245	1656	585	46	89	316	2842	1923	33	130
Mayo	716	3366	177	16	177	653	2963	245	30	147
Junio	1066	5790	106	33	317	1309	7258	129	13	511
Julio	3730	12652	434	251	969	2566	13394	600	37	687
Agosto	5259	22774	979	277	2675	14412	51935	811	203	5834
Septiembre	9122	42251	477	257	5280	16394	53234	460	277	5189
Octubre	2754	19568	359	434	611	5373	25613	308	84	1093
Noviembre	824	13014	423	654	258	2237	20585	423	375	256
Diciembre	427	5113	1307	431	298	291	7700	588	360	102

Tabla 1. Resumen del número de focos de incendios forestales contabilizados mensualmente sobre las regiones amazónicas de Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador y Perú.

3.2 Variación mensual del espesor óptico de aerosol para la Ciudad de Huancayo

La Figura 4 representa la evolución mensual del AOD en la longitud de onda de 500nm para la ciudad de Huancayo desde enero hasta diciembre de los años 2018 y 2019. Los datos son promedios y máximos mensuales, se observa que en la ciudad de Huancayo hay presencia de aerosoles atmosféricos durante todo el año, con valores máximos en los meses de agosto, septiembre y octubre, este incremento coincide con el inicio de incendios forestales en la región amazónica, el cual es muy común en temporada seca que comprende los meses de agosto a noviembre, meses donde registra la mayor cantidad de focos de incendios forestales en la región Amazónica; a su vez se puede observar un incremento en relación al tiempo, es decir que

para el año 2018 la presencia de aerosoles para cada mes del año fue menor en comparación de la presencia de aerosoles en el año 2019. En la siguiente tabla se describe los valores máximos, mínimos, media, mediana y desviación estándar del AOD a 500nm.

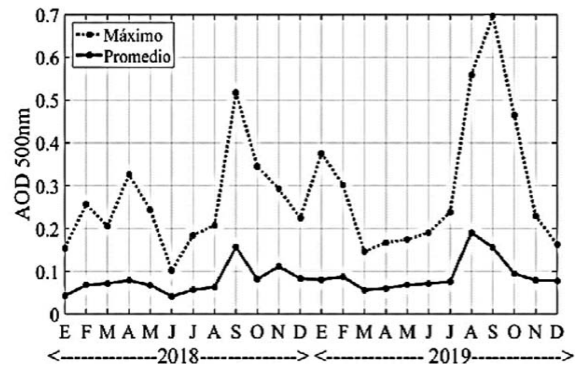


Figura 4. Variación mensual del AOD a 500nm.

Meses	AOD 500nm - 2018				AOD 500nm - 2019					
	Max	Min	Me	S	Max	Min	Me	S		
Enero	0.155	0.016	0.043	0.039	0.021	0.376	0.03	0.081	0.064	0.05
Febrero	0.256	0.015	0.068	0.06	0.033	0.301	0.02	0.087	0.073	0.061
Marzo	0.206	0.021	0.072	0.054	0.046	0.146	0.03	0.056	0.051	0.023
Abril	0.326	0.017	0.079	0.075	0.04	0.167	0.03	0.061	0.057	0.021
Mayo	0.243	0.025	0.068	0.063	0.027	0.174	0.03	0.068	0.064	0.025
Junio	0.102	0.015	0.042	0.037	0.017	0.191	0.03	0.072	0.068	0.024
Julio	0.185	0.015	0.057	0.056	0.021	0.238	0.02	0.076	0.067	0.032
Agosto	0.207	0.019	0.063	0.055	0.029	0.56	0.05	0.191	0.162	0.091
Septiembre	0.517	0.055	0.157	0.127	0.085	0.696	0.04	0.156	0.137	0.078
Octubre	0.345	0.024	0.082	0.069	0.045	0.465	0.04	0.095	0.087	0.035
Noviembre	0.293	0.034	0.112	0.102	0.048	0.229	0.03	0.079	0.073	0.03
Diciembre	0.225	0.029	0.083	0.083	0.033	0.163	0.04	0.078	0.073	0.027

Tabla 2. Máximo (Max), mínimo (Min), media (\bar{x}), mediana (Me) y desviación estándar (S) del espesor óptico de aerosol (AOD) a una longitud de onda de 500nm para los años 2018 y 2019.

La Tabla 2, fue elaborado a partir de los datos mensuales de AOD registrados en superficie por el fotómetro Cimel CE-318T en la ciudad de Huancayo durante los años 2018 y 2019.

Presenta un valor promedio de 0.091, un valor

mínimo de 0.015 y un valor máximo de 0.696. Los valores de AOD obtenidos se encuentran dentro del rango entre 0.6 a 2.4, lo que corresponde a aerosoles generados por la quema de biomasa (26). Y valores entre 0.25 a 1.7 corresponden a los generados en las zonas urbanas (27).

3.3 Variación espacial del espesor óptico de aerosol

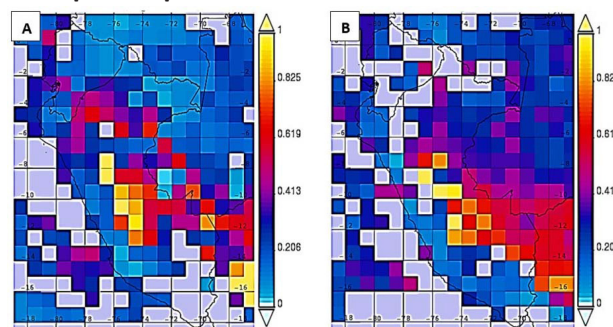


Figura 5. Variación espacial del AOD (A) 2018/09/14 – 2018/09/17 y (B) 2019/09/19 – 2019/09/22 para la ciudad de Huancayo obtenida de sistema MODIS – TERRA.

La Figura 5, describe la variación espacial del espesor óptico de aerosol a 550nm en Perú y las regiones amazónicas de Ecuador, Colombia, Brasil y Bolivia a 82.9687W, 18.457S, 66.2695W, 2.1094N para el mes de septiembre de los años 2018 y 2019, los valores obtenidos oscilan entre [0.2 - 1.0], con mayores valores en las regiones de Perú, Bolivia y Brasil.

La figura 6 muestra las corridas del modelo Hysplit representando una trayectoria regresiva para las últimas 72 horas a las alturas de 500, 1500 y 2500 metros sobre el nivel del suelo. La opción de conjunto de trayectorias iniciará múltiples trayectorias desde la primera ubicación de inicio seleccionada. Cada miembro del conjunto de trayectoria se calcula compensando los datos meteorológicos por un factor de cuadrícula fijo. Esto da como resultado 27 miembros para todos los desplazamientos posibles en X, Y y Z. Las figuras 6A-B corresponden al mes de septiembre del año 2018, se observa que los orígenes de las masas de aire provienen del norte y este de la ciudad de Huancayo, ubicándose en el punto norte las

regiones de Loreto, San Martín y Huánuco; las mismas que conforman la Selva Peruana y donde realizan principalmente actividades agrícolas, siendo este un indicador de que los aerosoles atmosféricos provenientes de esta zona son generados por la quema de biomasa. Mientras que en el punto este se ubica Brasil, y las masas de aire provienen de su región amazónica por lo que también indica que los incendios forestales son su principal fuente de origen. En las figuras 6C-D se aprecia las trayectorias de las masas de aire que corresponden al mes de septiembre del año 2019, en este caso el modelo de trayectoria inversa muestra un arrastre desde las regiones amazónicas de Bolivia y Brasil. Las retrotrayectorias calculadas con el modelo Hysplit muestran en general una dirección predominante de flujo de aire que proviene del norte y este de la ciudad de Huancayo, estos se originan en las regiones amazónicas de Brasil y Bolivia; también se ve la influencia de concentraciones locales principalmente desde las regiones ubicadas al norte de la ciudad de Huancayo.

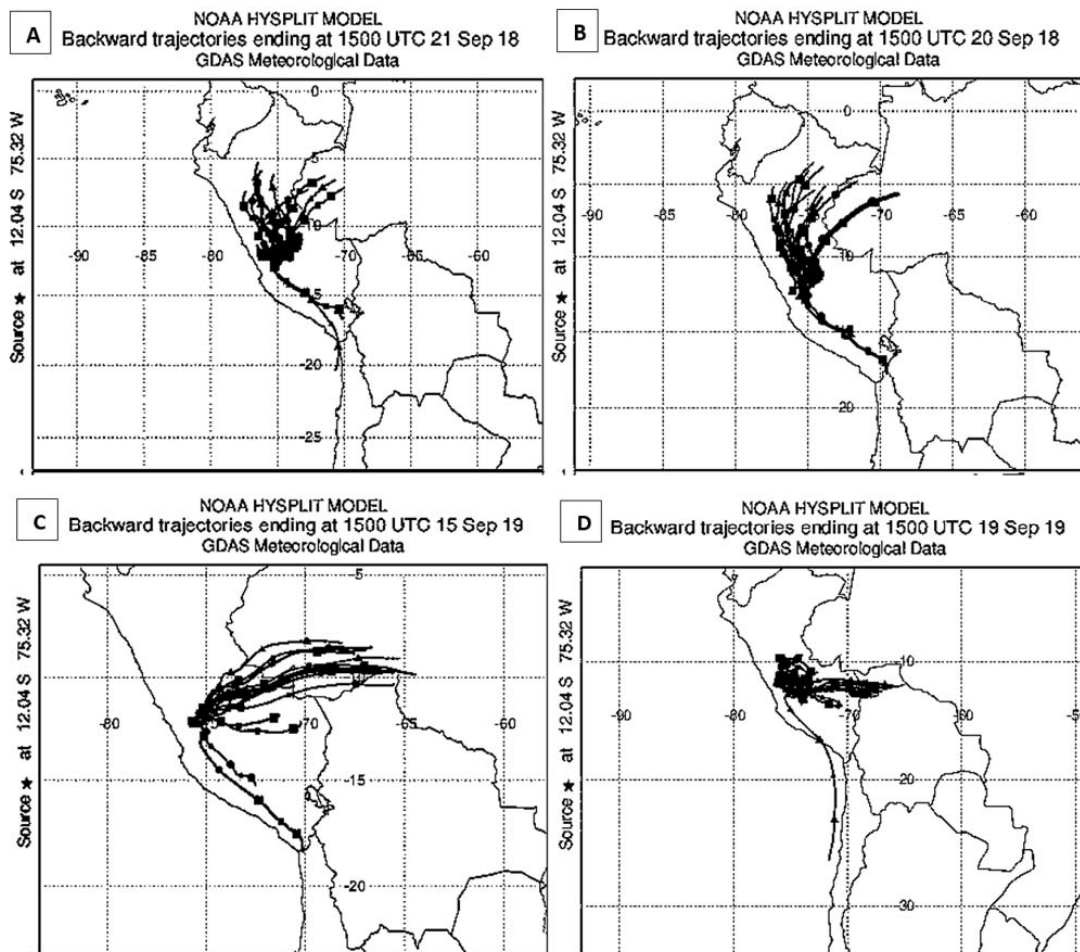


Figura 6. Corridas de modelo Hysplit en la ubicación inicial de -12,04 S y 75,32 W, utilizando los datos meteorológicos NAM.

En la Figura 7 se aprecia las corridas del modelo Hysplit representando una trayectoria regresiva a una altura de 1500 metros para las últimas 120 horas durante los meses de agosto y septiembre de los años 2018 y 2019 respectivamente. Los contornos representan el porcentaje del número de puntos finales de trayectoria en cada celda de la cuadrícula dividido por el número total de trayectorias calculadas. Para el año 2018 (Fig. 7A) se aprecia que las masas de aire provienen de Brasil y Bolivia alcanzando concentraciones de hasta un 40% en la frontera con el territorio Brasileño y un 10% en la frontera con el territorio Boliviano, lo mismo sucede con la Figura 8B que corresponde al año 2019 los puntos de origen de las masas de aire se ubican en las Regiones Amazónicas de Brasil y Bolivia por lo que las fuentes de origen son principalmente los

incendios forestales, la masa de aire en esta zona está por debajo de los 1500 metros; por lo tanto, el arrastre de contaminantes está en la capa de mezcla donde se acumulan los contaminantes provenientes de las capas bajas de la troposfera. Por lo tanto, las retro-trayectorias que llegan a la ciudad de Huancayo están en un rango de un 10% a 40%, en la frontera llega hasta un 50%, mientras que dentro del territorio peruano hasta un 90% el cual corresponde a concentraciones locales, los mismos que tienen una mayor influencia en el incremento de concentraciones de aerosoles atmosféricos en la ciudad de Huancayo. Por lo anterior se afirma entonces que la concentración de aerosoles atmosféricos en la ciudad de Huancayo está siendo influencia por los aerosoles generados en las regiones amazónicas de Brasil y Bolivia.

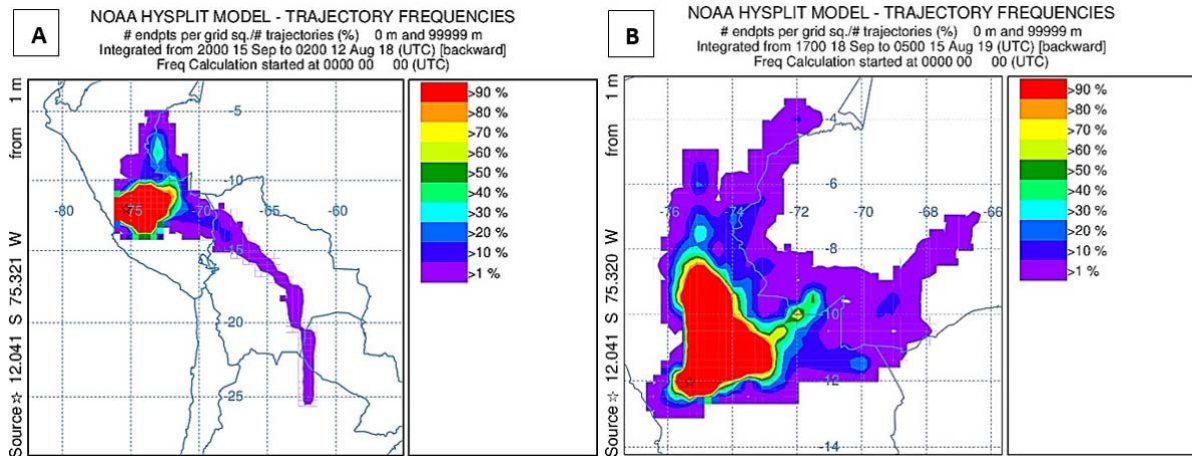
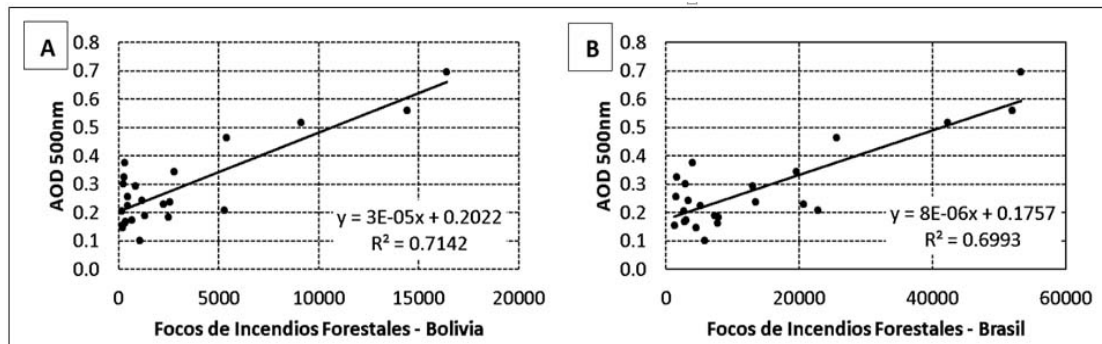


Figura 7. Gráfico de la frecuencia de la trayectoria de las masas de aire en 120 h desde una ubicación inicial de -12,04 S y 75,32 W a 1500 m sobre el nivel del suelo utilizando los datos meteorológicos NAM.

3.5 Análisis de la influencia del transporte de aerosoles atmosféricos

Para poder determinar la influencia del transporte de aerosoles atmosféricos producidos por incendios forestales en la Región Amazónica de Ecuador, Colombia, Brasil y Bolivia, se realizó un análisis de correlación mediante el coeficiente de determinación (R²); comparando un conjunto de datos de AOD a 500nm registrados en la ciudad de Huancayo con los datos de focos de incendios forestales producidos en la Región Amazónica. Este análisis nos permitió identificar si existe una variación significativa en las concentraciones de aerosoles y determinar si los incendios forestales generados en la región amazónica afectan a nuestro territorio.



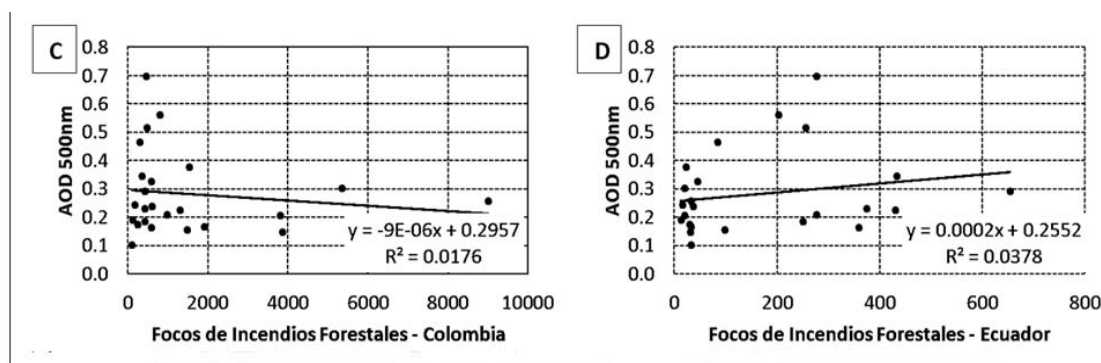


Figura 8. Diagrama de dispersión entre los valores de AOD a 500nm e incendios forestales de (A) Bolivia, (B) Brasil, (C) Colombia y (D) Ecuador de los años 2018 y 2019.

La Figura 8A representa la correlación de valores de AOD a 500nm registrados por el fotómetro Cimel CE-318T ubicado en la ciudad de Huancayo y el número de focos de incendios forestales registrados en la región Amazónica de Bolivia, la línea negra es la línea de regresión de mejor ajuste entre ambos datos, el coeficiente de determinación (R^2) es igual a 0.7142, lo cual indica que existe una correlación lineal significativa entre el número de focos de incendios y la variación del AOD, esto quiere decir que a mayor número de quemaduras producidas en la región amazónica de Bolivia se produce un incremento de AOD en la región Andina. Del mismo modo la Figura 8B representa el diagrama de correlación del AOD y el número de focos de incendios forestales en la región amazónica de Brasil, el coeficiente de determinación (R^2) es igual a 0.6993 indicando un nivel aceptable de linealidad entre los datos de AOD y los focos de incendios forestales, por lo tanto se afirma que los aerosoles atmosféricos generados en la región amazónica de Brasil producto de incendios forestales estarían afectando la calidad de aire en la ciudad de Huancayo produciendo una variación significativa en los niveles de AOD.

Las Figuras 8C-D, representan la correlación de los datos de AOD y los focos de incendios forestales generados en las regiones amazónicas de Colombia y Ecuador, los valores del coeficiente de determinación (R^2) son iguales a 0.0176 y 0.0378 respectivamente, lo cual indica un bajo nivel de linealidad entre los datos, por lo que se afirma que los aerosoles generados en Colombia y Ecuador no influyen en el incremento de concentraciones de aerosoles atmosféricos en nuestro territorio peruano.

Por lo tanto el transporte de aerosoles hacia la ciudad de Huancayo son desde los puntos

de incendios forestales ubicados en Bolivia y Brasil, afirmando lo obtenido por el modelo Hysplit mediante la trayectoria de las masas de aire que indican que el origen de los aerosoles atmosféricos son provenientes de Bolivia y Brasil, del mismo modo con la dispersión de las masas de aire según los puntos ubicados en Bolivia y Brasil se pudo observar que las emisiones de aerosoles atmosféricos son dispersados principalmente hacia el centro de Perú, donde está ubicada la ciudad de Huancayo y en menor medida hacia el norte del territorio peruano. Cabe precisar que el mayor número de incendios forestales tanto en Bolivia como en Brasil se encuentran ubicados en la frontera con Perú, mientras que en Colombia y Ecuador los mayores puntos de focos de incendios forestales están ubicados hacia el norte de ambos países.

La mayor influencia de las emisiones de aerosoles generados en las regiones amazónicas de Bolivia y Brasil hacen que la presencia de aerosoles en la ciudad de Huancayo cambien significativamente durante el año, y estos cambios son importantes para la calidad del aire en ciertos períodos del año, donde hay influencia de la quema de biomasa en la región amazónica de Bolivia y Brasil.

IV. DISCUSIÓN

La presencia de aerosoles en la ciudad de Huancayo presenta concentraciones más altas en los meses de agosto, septiembre y octubre (época seca), lo cual coincide con los meses en los que se presenta el mayor número de incendios forestales en las regiones amazónicas de Bolivia y Brasil, según (9 – 28) a la llegada de la época seca se tiene un mayor incremento en los valores de AOD y esto se debe al incremento de incendios forestales en

la Amazonia Boliviana y Brasileña, además en su investigación también afirma que el transporte de contaminantes atmosféricos principalmente de ozono troposférico y aerosoles en la Amazonía del Perú son producto de las quemadas de biomasa en Brasil, ya que según las técnicas de detección de aerosol realizadas se han determinado que los valores máximos se presentan en los meses de agosto a noviembre y, que la explicación a estos resultados es que estaría siendo influenciado por el transporte de contaminantes de Brasil; bajo esta premisa y tras los análisis realizados en la presente investigación se valida la idea planteada por (9) Suarez, et al., 2006, mediante la simulación realizada por el modelo Hysplit y demás análisis estadísticos, se concluyó que los valores del AOD registrados por el fotómetro Cimel CE-318T en la ciudad de Huancayo tiene influencia de las emisiones producidas por los incendios forestales en las regiones amazónicas de Bolivia y Brasil, mismo resultado que coincide con (10), quien menciona que en Perú, Brasil y Bolivia un gran porcentaje de los aerosoles atmosféricos provienen de la Amazonía, siendo la principal fuente de origen la quema de biomasa.

En el trabajo se aplicó el modelo Hysplit mediante el cual se determinó el origen, trayectoria y dispersión de las masas de aire, determinándose así que los aerosoles atmosféricos tienen como fuente los incendios forestales que provienen de las regiones amazónicas de Bolivia y Brasil, ya que las masas de aire generados en estas regiones siguen una trayectoria de este a oeste centrándose a lo largo de la sierra Peruana. Según (15) Stein et al., 2015, Hysplit es uno de los modelos más utilizados para realizar cálculos de trayectoria atmosférica y dispersión de aire, siendo muy eficiente a la hora de realizar estos cálculos. Además (20), mencionan que el modelo Hysplit es muy útil para interpretar un evento que afecta la calidad del aire. Los resultados obtenidos de la investigación muestran que menos de un 50% de retrotrayectorias cuyo origen son las regiones amazónicas de Bolivia y Brasil llegan a la Ciudad de Huancayo, afectando así la calidad del aire.

V. CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses en la realización del presente artículo.

VI. CONCLUSIONES

El mayor número de focos de incendios forestales registrados se presentan en los meses

de agosto, septiembre y octubre, este aumento coincide con los incendios generados por los agricultores de la región amazónica, con el fin de limpiar y preparar sus terrenos agrícolas (11). Además, estos incendios se localizan en un mayor número en la zona fronteriza de Bolivia, Brasil y Perú, coincidiendo con los resultados obtenidos de la variación espacial del AOD mediante la plataforma MODIS, el cual muestra una mayor incidencia en Bolivia, Brasil y Perú. Es importante destacar que en Perú la mayor concentración de número de focos de incendios se centra a lo largo de la sierra peruana.

Analizando el incremento de aerosoles atmosféricos en función al espesor óptico de aerosol (AOD) en la Ciudad de Huancayo principalmente durante los meses de agosto, septiembre y octubre, este estaría siendo influenciado por el transporte de aerosoles emitidos por la quema de vegetación en las regiones amazónicas de Bolivia y Brasil durante esos meses. Los datos obtenidos del AOD a 500nm muestran valores mínimos y máximos de 0.015 y 0.696 respectivamente, mientras que los valores de AOD a 340nm llegan hasta un máximo de 1.061, valor que se encuentran dentro del rango de [0.6 - 2.4] el cual corresponde a aerosoles generados por la quema de biomasa (26) afirmando una vez más la influencia de los aerosoles producidos por los incendios forestales en la región amazónica de Bolivia y Brasil. Por otro lado, los valores entre 0.25 a 1.7 corresponden a los generados en las zonas urbanas (27) lo cual indica también que los aerosoles presentes en la ciudad de Huancayo también estarían siendo influenciadas por emisiones locales.

La adecuada utilización del modelo Hysplit permitió conocer el origen, trayectoria y dispersión de los contaminantes atmosféricos que influyen en la calidad del aire de la ciudad de Huancayo. Según los resultados obtenidos con el modelo Hysplit se concluye que menos del 50% de las retrotrayectorias llegan a la ciudad de Huancayo y estas son provenientes de Bolivia y Brasil. Además según el análisis de dispersión con el modelo Hysplit en los puntos ubicados en Bolivia y Brasil muestran una dispersión hacia la zona centro del territorio Peruano, lugar donde se encuentra la ciudad de Huancayo alterando así la calidad del aire, por lo que es útil y necesario establecer una red de monitoreo continuo de las concentraciones de

material particulado principalmente en la sierra Peruana ya que es donde hay mayor incidencia del transporte de aerosoles atmosféricos, dada la importancia que su debido control significa para la preservación del ambiente y la salud de la población.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las siguientes instituciones: Observatorio de Huancayo del Instituto Geofísico del Perú y al Instituto Nacional de Investigación Espacial de Brasil – Brasil.

VII. REFERENCIAS

1. Flores Jiménez DE. Modelado del transporte y propuesta de metodología para la ubicación de estaciones de monitoreo de PM10 en una mina a cielo abierto. 2011; Available from: <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3653>
2. Ippc.ch. Available from: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf
3. Estrada BO. Informe de Síntesis del Tercer Informe de Evaluación del IPCC [Internet]. Aemet.es. Available from: https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/12066/1/Cambio_Climatico_Orfila.pdf
4. Moya Álvarez AS, Universidad Continental de Huancayo, Arredondo RE, Yuli Posadas RÁ, Universidad Continental de Huancayo, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. DE-TERMINACIÓN DE LA PRESENCIA DE PARTÍCULAS (PM10) EN PERÚ PRODUCIDAS POR QUEMA DE BIOMASA CON AYUDA DE MODELOS NUMÉRICOS. *Rev Int Contam Ambient* [Internet]. 2017;33(1):99–108. Available from: <http://dx.doi.org/10.20937/rica.2017.33.01.09>
5. Akagi SK, Yokelson RJ, Wiedinmyer C, Alvarado MJ, Reid JS, Karl T, et al. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. *Atmos Chem Phys* [Internet]. 2011;11(9):4039–72. Available from: <http://dx.doi.org/10.5194/acp-11-4039-2011>
6. Galanter M, Levy H II, Carmichael GR. Impacts of biomass burning on tropospheric CO, NO_x, and O₃. *J Geophys Res* [Internet]. 2000;105(D5):6633–53. Available from: <http://dx.doi.org/10.1029/1999jd901113>
7. Cholan E, Rojas J, Willems BL, Ocola LC. Estimación del espesor óptico de los aerosoles a partir de las imágenes del sensor MODIS sobre el Perú (2004-2005). *Rev Inv Fis* [Internet]. 2017;19(2). Available from: <http://dx.doi.org/10.15381/rif.v19i2.13557>
8. Silva Dias MAF. Cloud and rain processes in a biosphere-atmosphere interaction context in the Amazon Region. *J Geophys Res* [Internet]. 2002;107(D20). Available from: <http://dx.doi.org/10.1029/2001jd000335>
9. Suárez L, Castillo L, Marín M, Carrillo G, Rímac L, Pomalaya J, et al. Researchgate.net. Available from: https://www.researchgate.net/publication/275033085_Estudio_de_la_variacion_estacional_de_ozono_troposferico_y_aerosoles_del_Peru_relacionado_a_las_quemas_de_vegetacion_en_la_Amazonia
10. Piñas P. Espesor óptico de aerosoles generados por quema de biomasa y su influencia en el forzamiento radiativo terrestre. *Apunt cienc soc* [Internet]. 2015;05(02). Available from: <http://dx.doi.org/10.18259/acs.2015030>
11. Vivanco S. Variabilidad temporal de aerosoles atmosféricos en Huancayo. *Apunt cienc soc* [Internet]. 2014;04(01):57–68. Available from: <http://dx.doi.org/10.18259/acs.2014006>
12. Aguilar HM V. La Amazonia entre fuegos. *Revista de la Facultad de Ciencias Médicas (Quito)* [Internet]. 2019;44(1):6–12. Available from: http://dx.doi.org/10.29166/ciencias_medicas.v44i1.1965
13. Carrillo Socualaya Guisela J, Sanchez MRM. Estudio de los aerosoles - material particulado en la ciudad de Huancayo y su relación con la quema de biomasa en Brasil [Internet]. Universidad Nacional del Centro del Peru; 2007. Available from: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/212>

14. Romero N, Mirtha D. Caracterización de la variación diurna, mensual y estacional del espesor óptico de aerosoles, registrados en el observatorio de Huancayo, periodo marzo-2015 hasta julio-2016 [Internet]. Universidad Continental; 2017. Available from: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/3825>
15. Stein AF, Draxler RR, Rolph GD, Stunder BJB, Cohen MD, Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. Bull Am Meteorol Soc [Internet]. 2015; 96(12):2059–77. Available from: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/96/12/bams-d-14-00110.1.xml>
16. Cuesta-Santos O, Collazo A, Gonzalez M, Wallo A. Wet and dry deposition of atmospheric nitrogen in three hydrographic basins in Cuba [Internet]. lahs.info. Available from: <https://iahs.info/uploads/dms/13725.106-591-595-22-308-OSVALDOCUESTA.pdf>
17. Santos OC, González González ML, Bultó PO, Aranda AC. Repercusiones ecológicas de los compuestos del nitrógeno atmosférico en Cuba. Revista Cubana de Meteorología [Internet]. 2000; 7(1). Available from: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/386>
18. Aerosol Robotic Network (AERONET) Homepage [Internet]. Nasa.gov. Available from: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
19. Home — Programa Queimadas [Internet]. Inpe.br. 2016. Available from: <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal>
20. Zamora YG, Santos OC. Aplicación del Modelo HYSPLIT en estudios de contaminación atmosférica en la estación regional La Palma. Estudios de Caso. Revista Cubana de Meteorología [Internet]. 2011;17(2):87–95. Available from: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/113>
21. Villar Lagos G. Estudio de modelos de dispersión y su aplicación al control industrial [Internet]. e_BUAH. Biblioteca digital Universidad de Alcalá; 2017. Available from: <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/30263>
22. Barrás RMG. Modelo lagrangiano de difusión de partículas por el método Monte Carlo [Internet]. Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones; 1993. Available from: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/1902/>
23. Draxler RR. Seminario de capacitación para el uso del modelo HYSPLIT en PC Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model [Internet]. Noaa.gov. Available from: <https://www.arl.noaa.gov/documents/workshop/hysplit1/spanish/startme.pdf>
24. Draxler RR, Rolph GD. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model access via NOAA ARL READY website (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>), NOAA Air Resources Laboratory. Silver Spring, MD [Internet]. 2010;25. Available from: https://www.ready.noaa.gov/hysplit_metadata.html
25. Rolph G, Stein A, Stunder B. Real-time environmental applications and display system: READY. Environ Model Softw [Internet]. 2017;95:210–28. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>
26. Eck TF, Holben BN, Reid JS, O'Neill NT, Schafer JS, Dubovik O, et al. High aerosol optical depth biomass burning events: A comparison of optical properties for different source regions. Geophys Res Lett [Internet]. 2003;30(20). Available from: <http://dx.doi.org/10.1029/2003gl017861>
27. Castro T, Madronich S, Rivale S, Muhlia A, Mar B. The influence of aerosols on photo-chemical smog in Mexico City. Atmos Environ (1994) [Internet]. 2001;35(10):1765–72. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00449-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00449-0)
28. Rojas Benavente N, Rojas Acuña J. Estudio de la dinámica del espesor óptico de los aerosoles en Perú y América del Sur a partir de las imágenes MODIS de los satélites TERRA y AQUA en el periodo 2000-2013. Rev Inv Fis [Internet]. 2015;18(1):1–20. Available from: <http://dx.doi.org/10.15381/rif.v18i1.11577>