



Universidad  
Continental

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

**Estudio del espesor óptico de los aerosoles  
generados por la quema de biomasa y su  
influencia en el forzamiento radiativo  
terrestre para la ciudad de Huancayo**

**Pamela Rocio Piñas Sumalave**

Huancayo, 2017

Tesis para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Ambiental



Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

**ASESOR**

Ing. Edwin Paucar Palomino

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco de manera especial a las siguientes instituciones: Dirección de Investigación de la Universidad Continental y al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), que trabajan en convenio con este proyecto de investigación, por la oportunidad de pertenecer como tesista, lo que incluye la asesoría brindada y el financiamiento económico. Al Observatorio de Huancayo, perteneciente al Instituto Geofísico del Perú, por el trabajo que realizan en el mantenimiento y operación del Fotómetro Solar CIMEL CE-318T, el cual forma parte de AERONET, cuya información ha sido vital para esta investigación.

Al Director de la Dirección de Investigación, Mg. Wilfredo Bulege. A mis tutores, el Dr. René Estevan Arredondo como tutor externo, quien es, además, el investigador principal del proyecto en mención, que me enseñó, apoyó y colaboró de manera incondicional para el desarrollo de esta tesis y me dejó un gran aprendizaje; asimismo, al Ing. Edwin Paucar Palomino como asesor interno, por su asesoría y colaboración; ambos profesionales fueron clave para la culminación exitosa del presente proyecto. Muchas gracias. Es necesario, también, mencionar al Ing. Luis Suarez, investigador en Ciencias Atmosféricas por su asesoría; al Dr. Aldo Moya por la colaboración con imágenes obtenidas por el modelo WRF-CHEM y otros apoyos.

A mis amigos y a todas las personas que influyeron positivamente en mí, para lograr culminar la tesis y obtener el título profesional como Ingeniero Ambiental.

## **DEDICATORIA**

Dedicado a mi familia, en especial a mis padres Beatriz Sumalave y Oswaldo Piñas, quienes fueron mi soporte e impulso necesario para lograr éste y muchos otros objetivos en la vida.

## ÍNDICE

ASESOR.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA.....	v
ÍNDICE .....	vi
LISTA DE TABLAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT .....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	xiv
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	1
1.1. CARACTERÍSTICAS Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL PROBLEMA .....	1
1.1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3. JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN.....	4
1.3.1. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA.....	4
1.3.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA .....	4
1.3.3. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA.....	4
1.4. HIPÓTESIS Y DESCRIPCIÓN DE VARIABLES .....	5
1.4.1. HIPÓTESIS .....	5
1.4.2. VARIABLES .....	6
1.5. OPERACIONALIZACIÓN.....	7
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	8
2.1.1. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS.....	8
2.1.2. TESIS DE INVESTIGACIÓN .....	11
2.1.3. ARTÍCULOS DE DIVULGACIÓN .....	12
2.2. BASES TEÓRICAS.....	13
2.2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	13
2.2.2. METODOLOGÍAS EXISTENTES.....	20
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS: .....	29
CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....	32

3.1.	MÉTODO Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN .....	32
3.1.1.	MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN .....	32
3.1.2.	ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN .....	34
3.2.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	35
3.2.1.	TIPO DE DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	35
3.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	36
3.4.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	36
3.4.1.	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	36
3.4.2.	INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LA RECOLECCIÓN DE DATOS:.....	37
3.5.	ÁREA DE ESTUDIO .....	37
3.6.	TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y TRATAMIENTO DE DATOS.....	38
3.6.1.	MATLAB (MATRIX LABORATORY).....	38
3.6.2.	PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE AERONET .....	39
3.6.3.	PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE MODIS .....	40
3.6.4.	PROCESAMIENTO DE FOCOS DE INCENDIO USANDO ACRESP PARA SU COMPARACIÓN CON LAS CONCENTRACIONES DE PM10 (WRF-CHEM) .....	42
3.6.5.	MODELO HYSPLIT .....	43
3.6.6.	MODELO SBDART .....	43
3.6.7.	PROGRAMAS DE TRATAMIENTO ESTADÍSTICO .....	47
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		48
4.1.	RESULTADOS DEL TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	48
4.1.1.	CLASIFICACIÓN DE LOS AEROSOLES ATMOSFÉRICOS EN HUANCAYO .....	48
4.1.2.	COMPARACIÓN DE LOS DATOS DE AERONET - MODIS:.....	70
4.1.3.	DETERMINACIÓN DEL FORZAMIENTO RADIATIVO EN HUANCAYO A TRAVÉS DEL MODELO SBDART .....	89
4.2.	PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	104
4.2.1.	INFLUENCIA DEL EOA EN EL FORZAMIENTO RADIATIVO .....	104
4.2.2.	CLASIFICACIÓN DE LOS AEROSOLES ATMOSFÉRICOS EN HUANCAYO .....	108
4.2.3.	RELACIÓN ENTRE LOS DATOS DE AERONET Y MODIS.....	109
4.2.4.	FORZAMIENTO RADIATIVO EN HUANCAYO .....	110
4.3.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	110
4.3.1.	INFLUENCIA DEL EOA EN EL FORZAMIENTO RADIATIVO .....	110
4.3.2.	CLASIFICACIÓN DE LOS AEROSOLES ATMOSFÉRICOS EN HUANCAYO .....	111
4.3.3.	RELACIÓN ENTRE LOS DATOS DE AERONET Y MODIS.....	112
CONCLUSIONES.....		113

RECOMENDACIONES .....	114
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	115
ANEXOS.....	118

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de las variables.....	7
Tabla 2. Modelo teórico de investigación.....	27
Tabla 3. Instrumentos y técnicas de recolección de datos. ....	37
Tabla 4. Parámetros de los aerosoles que constituyen las variables de entrada para SBDART, para cada día analizado y los tres horarios empleados. El valor entre paréntesis en la columna Día, corresponde al valor del día consecutivo dentro del año. ....	46
Tabla 5. Selección de colores de acuerdo a la clasificación de los aerosoles. ....	49
Tabla 6. Selección de fechas para los casos estudios, correspondientes a MODIS y AERONET. ....	72
Tabla 7. Comparación entre Perú y la región de estudio, respecto a las emisiones promedios. ....	74
Tabla 8. Valores máximos de variación en los FAtop y FDsrf. ....	102
Tabla 9. Máximos y mínimos del FRAtop y FRAsrf. ....	103
Tabla 10. Forzamiento radiativo integrando las longitudes de onda en superficie.....	104
Tabla 11. Análisis de la prueba t para dos muestras (Forzamiento radiativo en cielo claro y en atmósfera perturbada) para el día 257.....	105
Tabla 12. Análisis de la prueba t para dos muestras (Forzamiento radiativo en cielo claro y en atmósfera perturbada) para el día 259.....	106
Tabla 13. Análisis de la prueba t para dos muestras (Forzamiento radiativo en cielo claro y en atmósfera perturbada) para el día 260.....	106
Tabla 14. Análisis de la prueba t para dos muestras (Forzamiento radiativo en cielo claro y en atmósfera perturbada) para el día 262.....	107
Tabla 15. Análisis de la prueba t para dos muestras (Forzamiento radiativo en cielo claro y en atmósfera perturbada) para el día 268.....	108
Tabla 16. Análisis de correlación de los datos de AERONET y MODIS.....	109
Tabla 17. Análisis de varianza de los datos de AERONET y MODIS.....	109

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de trabajo seleccionada con la ubicación del fotómetro solar en el Observatorio de Huancayo, perteneciente al IGP. ....	38
Figura 2. Valores de EOA registrados durante el 2015. ....	48
Figura 3. Distribución del EOA en el 2015, de acuerdo a la clasificación de los diversos tipos de aerosoles. ....	50
Figura 4. Estadística y representación gráfica de los porcentos de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de marzo-2015. ....	51
Figura 5. Estadística y representación gráfica de los porcentos de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de abril-2015. ....	52
Figura 6. Estadística y representación gráfica de los porcentos de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de mayo-2015. ....	53
Figura 7. Estadística y representación gráfica de los porcentos de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de junio-2015. ....	54
Figura 8. Estadística y representación gráfica de los porcentos de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de julio-2015. ....	55
Figura 9. Estadística y representación gráfica de los porcentos de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de agosto-2015. ....	56
Figura 10. Estadística y representación gráfica de los porcentos de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de septiembre-2015. ....	57
Figura 11. Estadística y representación gráfica de los porcentos de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de octubre-2015. ....	59
Figura 12. Estadística y representación gráfica de los porcentos de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de noviembre-2015. ....	60
Figura 13. Estadística y representación gráfica de los porcentos de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de diciembre-2015. ....	61
Figura 14. Comportamiento mensual de las medias del EOA. ....	62
Figura 15. Tipos de aerosoles según datos de MODIS para el mes de agosto de 2015 para los días: 26 a); 27 b); 28 c); 29 d); 30 e) y 31 f). ....	64
Figura 16. Tipos de aerosoles según datos de MODIS para el mes de septiembre de 2015 para los días: 1 a); 2 b). ....	65
Figura 17. Tipos de aerosoles según datos de MODIS para el mes de septiembre de 2015 para los días: 10 a); 11 b); 12 c); 14 d); 15 e); 16 f); 17 g); 18 h) y 19 i). ....	66
Figura 18. Tipos de aerosoles según datos de MODIS para el mes de septiembre de 2015 para los días: 24 a); 25 b); 26 c). ....	68
Figura 19. Tipos de aerosoles según datos de MODIS para el mes de octubre de 2015 para los días: 12 a); 13 b); 14 c) y 15 d). ....	69
Figura 20. Correlación de los datos de AERONET y MODIS. ....	70
Figura 21. Mediciones coincidentes de MODIS, basadas en el criterio espacio-temporal definido con el fotómetro solar para el día 17 de septiembre de 2015. ....	71
Figura 22. Total de focos de incendios para los meses de agosto a); septiembre b); y octubre c), período correspondiente a la quema de biomasa. Se muestra el número de focos por meses, así como, las emisiones promedio de material particulado (PM10), en Kg/día. ....	73
Figura 23. Concentraciones medias mensuales de material particulado (PM10), generadas por el modelo WRF-CHEM en unidades $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , para los meses de agosto a); septiembre b) y octubre c). ....	76
Figura 24. Concentraciones promedio de PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) generadas por el WRF-CHEM, sobre las coordenadas del fotómetro solar y valores de medios de Espesor Óptico por Aerosoles en la longitud de onda de 500 nm, para las fechas seleccionadas como casos de estudio. ....	77

Figura 25. Análisis de las retrotrayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 14 de septiembre en el horario de las 17:00 UTM. ....	79
Figura 26. Análisis de las retrotrayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 14 de septiembre en el horario de las 18:00 UTM. ....	80
Figura 27. Análisis de las retrotrayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 16 de septiembre en el horario de las 18:00 UTM. ....	82
Figura 28. Análisis de las retrotrayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 17 de septiembre en el horario de las 18:00 UTM. ....	83
Figura 29. Análisis de las retrotrayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 17 de septiembre en el horario de las 19:00 UTM. ....	85
Figura 30. Análisis de las retrotrayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 19 de septiembre en el horario de las 18:00 UTM. ....	86
Figura 31. Análisis de las retrotrayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 19 de septiembre en el horario de las 19:00 UTM. ....	87
Figura 32. Análisis de las retrotrayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 25 de septiembre en el horario de las 18:00 UTM. ....	89
Figura 33. Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 14 de septiembre (14 UTM). .	91
Figura 34. Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 14 de septiembre (17 UTM). .	91
Figura 35. Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 16 de septiembre (14UTM). .	93
Figura 36. Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 16 de septiembre (17UTM). .	93
Figura 37. Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 16 de septiembre (20UTM). .	94
Figura 38. Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 17 de septiembre (14 UTM). .	95
Figura 39. Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 17 de septiembre (17 UTM). .	96
Figura 40. Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 17 de septiembre (20 UTM). .	96
Figura 41. Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 19 de septiembre (14 UTM). .	97
Figura 42. Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 19 de septiembre (17 UTM). .	98
Figura 43. Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 19 de septiembre (20 UTM). .	98
Figura 44. Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 25 de septiembre (14 UTM). .	99
Figura 45. Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 25 de septiembre (17 UTM). .	100
Figura 46. Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 25 de septiembre (20 UTM). .	100
Figura 47. FRA día 14 de septiembre. ....	122
Figura 48. FRA día 16 de septiembre. ....	122
Figura 49. FRA día 17 de septiembre. ....	123
Figura 50. FRA día 19 de septiembre. ....	123
Figura 51. FRA día 25 de septiembre. ....	124

## RESUMEN

**Objetivo:** Evaluar la influencia de los aerosoles atmosféricos generados por la quema de biomasa, a partir del estudio de su espesor óptico en el forzamiento radiativo terrestre para la ciudad de Huancayo. **Métodos:** El método general fue deductivo-analítico, pero su finalidad es aplicada; por su alcance temporal, es seccional, el alcance de la investigación es descriptivo-correlacional, diseño no experimental de tipo transaccional correlacional. El área de estudio fue la ciudad de Huancayo, con el punto de referencia donde se ubica el fotómetro solar. La descarga de datos del Espesor Óptico de los Aerosoles (EOA) se realizó del fotómetro solar CIMEL CE318, del sensor MODIS a bordo del satélite Aqua. Los focos de incendio fueron descargados de ACRESP. **Resultados:** Existe forzamiento radiativo negativo provocado por la presencia de aerosoles, es decir, produce un enfriamiento en superficie; además se comprueba la relación que existe entre el espesor óptico de aerosoles, los focos de incendio y el forzamiento radiativo. El mes con mayor número de focos de incendio fue setiembre con 44724, en este mes se registró, también, el mayor valor medio de EOA con 0,173. Luego de identificar casos de estudio y analizarlos, se obtuvo que el mayor forzamiento radiativo fue para el 14 de setiembre, día en el cual el EOA es mayor, con una gran coincidencia respecto a los focos de incendio. El coeficiente de correlación R de los datos de AERONET y MODIS fue de 0,22 ( $p < 0,05$ ). **Conclusiones:** Se llegó a la conclusión de que existe una influencia significativa del EOA en el forzamiento radiativo terrestre en la ciudad de Huancayo. Por otro lado, la correlación existente entre los datos de MODIS y AERONET no es significativa, sin embargo, fue posible seleccionar casos de estudio que evidenciaron no solo el objetivo principal de la tesis, sino también quemas de biomasa de países vecinos que afectan al nuestro.

**PALABRAS CLAVE:** Aerosoles, forzamiento radiativo, espesor óptico de aerosoles.

## ABSTRACT

**Objective:** To evaluate the influence of atmospheric aerosols generated by biomass burning based on the study of its optical thickness in radiative forcing of Huancayo.

**Methods:** The general method was deductive-analytical, for its purpose is applied, for its temporal scope is sectional, the scope of the research is descriptive-correlational, non-experimental design and correlational transactional type. The study area was the city of Huancayo, with the reference point in which the solar photometer is located. The Aerosol Optical Depth (AOD) data was download from the CIMEL CE318 solar photometer and from the sensor MODIS on board the Aqua satellite. Fire sources were downloading from ACRESP. **Results:** There is negative radiative forcing caused by the presence of aerosols, it means that it produces a surface cooling. Besides, the relationship between AOD, fire sources and radiative forcing is verified. The month with the highest number of fire places was September with 44724. This month also recorded the highest middle value of AOD with 0,173. After identifying cases of study and analyzing them, it was obtained that the biggest radiative forcing was for September 14, the day in which the AOD is higher, with a big coincidence respect to the fire sources. The correlation coefficient R of the AERONET and MODIS data was 0,22 ( $p < 0,05$ ). **Conclusions:** It was concluded that there is a significant influence of AOD over radiative forcing in Huancayo. On the other hand, the correlation between MODIS and AERONET data is not significant; however, it was possible to select some study cases that showed not only the main objective of the thesis, but also that biomass fires in neighboring countries affect ours.

**KEY WORDS:** Aerosols, radiative forcing, aerosol optical depth.

## INTRODUCCIÓN

Los aerosoles generados por la quema de biomasa son una importante contribución en la contaminación del aire (DENG, y otros, 2008). Estudios realizados en la región tropical, indican que la quema de vegetación es responsable de la emisión de 2 a  $5 \times 10^5$  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 (CRUTZEN, y otros, 1997). Por ello, existe la preocupación de estudiar dichos aerosoles considerando que recientes reportes indican que, en el Perú, solo en el mes de agosto de 2016, se detectaron 1935 quemas e incendios. Algunos datos adicionales brindados por el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil (INPE), indican la influencia de las quemas de vegetación de países vecinos sobre el nuestro y viceversa, resaltando Brasil y Bolivia (VELEZ, 2016).

El riesgo ambiental que representa la contaminación de aire para la salud va en incremento a través de los años, siendo así que para noviembre de 2015 un monitoreo de calidad de aire en Huancayo dieron resultados alarmantes para nuestra ciudad, indicando dentro de estos la superación de los Estándares de Calidad de Aire (ECA) establecidos para PM 2,5 en el Perú con  $35 \mu\text{g}$ , siendo  $25 \mu\text{g}$  los permitidos (MITMA, 2015). Considerando que los aerosoles son aquellas partículas menores a  $10 \mu\text{m}$  de diámetro. Además, la Organización Mundial de Salud (OMS), informa que cada año mueren al menos 3 millones de personas a causa de los altos niveles de contaminación de aire (OMS, 2016).

El movimiento de las masas de aire lleva consigo, entre otras partículas y compuestos, aerosoles originados como consecuencia de la quema de biomasa. Los aerosoles atmosféricos tienen un efecto directo e indirecto en el forzamiento radiativo; directo, por la absorción y dispersión de la radiación solar, e indirecto, al alterar 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, este forzamiento radiativo puede ser considerado como positivo o negativo; el primero contribuye al calentamiento de la superficie de la tierra, y el segundo favorece su enfriamiento (IPCC, 2007).

Si bien es cierto que, en la ciudad de Huancayo y zonas aledañas en el Valle del Mantaro, el porcentaje de incendios forestales y quemas de biomasa es menor que en la Amazonía Peruana y países vecinos, la región no está exenta del efecto de los aerosoles generados por estos. Estos aerosoles son transportados por las masas de aire y llegan a la ciudad de Huancayo. Por tal motivo, el objetivo principal de esta tesis es conocer si los aerosoles generados por la quema de biomasa tienen influencia o no en la ciudad de Huancayo, para

lo cual es necesario aplicar diversas metodologías y técnicas que permitirán determinar la presencia o no de estos aerosoles y el efecto radiativo de los mismos.

En el proceso de determinación del forzamiento radiativo se usó el modelo SB-DART, para obtener medidas de diversas variables a través de ciertos instrumentos. Se han empleado las variables obtenidas a través del fotómetro solar de AERONET (Aerosol Robotic Network). Esta es una red que emplea más de 450 fotómetros solares CIMEL CE-318, perteneciente a la National Aeronautic and Space Administration (NASA), y pone a disposición de los usuarios, mediante su página web, información sobre el espesor óptico por aerosoles y otras variables. Desde este sitio fueron obtenidos los datos que serán empleados para la realización de esta investigación.

A partir de la obtención del EOA, el Coeficiente de Angstrom en sus diferentes bandas espectrales, el Factor de Asimetría, el Albedo de Simple Dispersión y el Coeficiente de Extinción, fue posible el procesamiento y análisis de los datos, empleando para ello scripts desarrollados con el programa MATLAB. Además del fotómetro solar, se utilizaron los datos del instrumento científico MODIS a bordo del Satélite Aqua (NASA, 2015).

En esta investigación se requieren modelos para el procesamiento y análisis de los datos, se usó entonces el modelo HYSPLIT, en su versión en línea para conocer la trayectoria de los aerosoles. Otro modelo, que se mencionó previamente, fue el SB DART.

En el capítulo I de la presente tesis se abarca el problema de la investigación, partiendo del planteamiento del problema, seguido por la formulación del mismo, siendo este: ¿Qué influencia tienen los aerosoles atmosféricos generados por la quema de biomasa a través de su espesor óptico en el forzamiento radiativo terrestre para la ciudad de Huancayo? Posterior a ello fue necesario establecer los problemas específicos. Además, se presentan los objetivos, las justificaciones prácticas, metodológicas y técnicas de la investigación. La hipótesis y variables más su operacionalización son detallados también en este capítulo.

En el capítulo II tenemos el marco teórico de la tesis, esto incluyen los antecedentes de la investigación, que nos dan referencia y base en relación de lo que se conoce hasta el momento del tema de estudio en Huancayo. También se presenta la teoría que fundamenta la investigación y la definición de términos claves para su entendimiento.

En el capítulo III tenemos los métodos que fueron utilizados para el desarrollo de la tesis, como método general; la presente investigación se clasifica como deductiva analítica. Se presenta también el método específico, el nivel, tipo y diseño de la investigación. Se detalla

la población y muestra del estudio, y finalmente, las técnicas e instrumentos que fueron usados para la recolección de data y el procesamiento de los mismos.

En el capítulo IV se exponen los resultados y discusiones de los resultados, empezando por el resultado de la clasificación del EOA, la correlación de los datos de MODIS y AERONET, el cálculo del forzamiento radiativo y la influencia de los aerosoles atmosféricos en el forzamiento radiativo terrestre. Se abarca también la estadística descriptiva e inferencial para la prueba de hipótesis, tanto general como específica con un nivel de confianza al 95%.

Finalmente, presentamos las conclusiones y recomendaciones a las que he llegado después de desarrollar esta investigación, así como las referencias bibliográficas que fueron usadas a lo largo de la tesis.

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

### **1.1. CARACTERÍSTICAS Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

#### **1.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL PROBLEMA**

La problemática y las consecuencias que traen los aerosoles atmosféricos crecen con el paso del tiempo, de acuerdo a la OMS para el 2014 al menos el 92% de la población se encontraba viviendo en lugares que incumplían los valores fijados respecto a la calidad del aire, y cada año mueren de manera prematura un promedio de 3 millones de personas a causa de la contaminación atmosférica, según estimaciones al 2012 de la OMS (OMS, 2016).

Como ha sido mencionado, la quema de biomasa tiene gran contribución en lo que respecta a los aerosoles atmosféricos (DENG, y otros, 2008), que son partículas menores a 10 micrones de diámetro, que además son las más perjudiciales para la salud.

Si hacemos un análisis en América del Sur, los países que más contribuyen en la emisión de aerosoles atmosféricos son Brasil, Bolivia y Perú, que son los países con mayor cantidad de focos de incendios de acuerdo a un estudio realizado a través de una supercomputadora Tupã por el Instituto Nacional de Investigadores Espaciales (INPE) de Brasil (ALISSON, 2014). En una declaración de Saulo Ribeiro de Freitas, investigador del INPE de Brasil, menciona que la mayor producción de aerosoles debido a quemas de biomasa corresponde a Brasil, pero que a causa de procesos meteorológicos y otros, Brasil exporta este humo contaminando a otros países de la región, en la que se encuentra el Perú. Freitas, además menciona que,

en toda América del Sur, diariamente se detectan al menos 5 mil focos de incendios. Cifra verdaderamente alarmante.

Ahora la relación causa-efecto de estos aerosoles atmosféricos y el forzamiento radiativo terrestre son un problema de mucha incertidumbre en la actualidad, es así que las investigaciones realizadas en los últimos años en ciencias atmosféricas y cambio climático tienen gran enfoque en dicha problemática. De acuerdo al informe sobre cambio climático del 2007 presentado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, tanto las concentraciones de gases por el efecto invernadero como los aerosoles antropogénicos tienen una influencia en el forzamiento radiativo terrestre al alterar el balance de energía entrante y saliente del sistema tierra-atmósfera, que a su vez influye en el cambio climático (IPCC, 2008).

Enfocándonos en Huancayo, la zona de estudio, el año pasado luego de un monitoreo de calidad de aire, se encontró que la ciudad supera ampliamente los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para PM 2,5 siendo 35  $\mu\text{g}$  lo que se halló, mientras que lo permitido es de 25  $\mu\text{g}$ , además, también, se sobrepasan los niveles permitidos de azufre. Esto de acuerdo al informe presentado, es en parte provocado por el parque automotor e industrias de la ciudad (MITMA, 2015). Sin embargo, como ya fue mencionado, hay un gran porcentaje de aerosoles de origen de quema de biomasa que llega al Perú, incluyendo Huancayo, no solo de fuera, sino del mismo país y de la misma ciudad.

Cabe mencionar que, para desarrollar esta problemática, que se origina en las quemadas de biomasa, al generar aerosoles atmosféricos y de la influencia de estos en el forzamiento radiativo terrestre, es necesario el estudio del espesor óptico. Esta es una propiedad fundamental en la caracterización de aerosoles y variable indispensable para el cálculo del forzamiento radiativo. Es por ello que se origina la problemática principal del estudio, siendo: ¿Cuál es el efecto que provocan los aerosoles atmosféricos generados por la quema de biomasa a través de su espesor óptico en el forzamiento radiativo terrestre para la ciudad de Huancayo?

## **1.1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.1.2.1. Problema general**

¿Qué influencia tienen los aerosoles atmosféricos generados por la quema de biomasa a través de su espesor óptico en el forzamiento radiativo terrestre para la ciudad de Huancayo?

### **1.1.2.2. Problemas específicos:**

- a) De los aerosoles que llegan a Huancayo, ¿Cuáles son generados por la quema de biomasa?
- b) Al obtener data de las fuentes AERONET y MODIS, ¿Cómo relacionar la información obtenida de ambas fuentes para seleccionar los casos de estudio?
- c) ¿Existe un forzamiento radiativo a causa de los aerosoles atmosféricos generados por la quema de biomasa en Huancayo?

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la influencia de los aerosoles atmosféricos a partir del estudio de su espesor óptico, generados por la quema de biomasa, en el forzamiento radiativo para la ciudad de Huancayo.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Clasificar los aerosoles que llegan a Huancayo en base a sus propiedades ópticas y microfísicas (EOA y Coeficiente de Angstrom).
- b) Comparar los datos obtenidos por AERONET y MODIS a través de una correlación para seleccionar las fechas que serán consideradas como casos de estudio.
- c) Determinar si existe forzamiento radiativo en Huancayo a través del modelo SBDART.

## **1.3. JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN**

### **1.3.1. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA**

La contaminación atmosférica viene cobrando un promedio de 3 millones de muertes prematuras a nivel mundial a causa de la exposición a aerosoles atmosféricos (Organización Mundial de la Salud - 2015), que además influirían de manera directa en el forzamiento radiativo terrestre. Este gran problema, llevado a nuestro país, y más específicamente a Huancayo, es una de las necesidades más importantes (ello sin mencionar el daño causado a otros sectores como el ambiental, económico, social, educacional y cultural) que debe considerarse para poner un plan de acción. Por ello, la necesidad de investigar acerca de los aerosoles atmosféricos provenientes de la quema de biomasa y conocer la influencia que tienen las emisiones de aerosoles de países vecinos sobre el nuestro.

Con los resultados de esta investigación, se busca ser parte de una base de datos junto con otras investigaciones existentes y futuras que ayuden en la toma de decisiones, y de ser posible, influir en la revisión de la legislación en busca de la prevención de problemas ambientales y sus consecuencias. Lograr un gran aporte con la elaboración de una base de datos confiables de EOA y la cuantificación de la modificación del balance radiativo terrestre para el año 2015.

### **1.3.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA**

La realización de esta investigación busca servir de guía metodológica y estratégica para el tratamiento de datos de aerosoles atmosféricos y la validez de los mismos, con la finalidad de generar conocimiento válido y confiable en futuras investigaciones de las cuales esta servirá como base.

### **1.3.3. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA**

El Perú es uno de los países con mayor cantidad de focos de incendios en América del Sur (ALISSON, 2014), dentro de este se encuentra Huancayo, capital del departamento de Junín, ubicado en la zona centro del Perú. Huancayo es probablemente una de las ciudades más afectadas por aerosoles procedentes de la quema de biomasa. Los ciudadanos relacionan la contaminación con temas industriales o parque automotor, que si bien es cierto tienen un gran aporte, sin

embargo, las quemas de biomasa serían una importante contribución en este sentido.

El 2015, luego de un monitoreo de calidad de aire, se supo que Huancayo superaba los Estándares de Calidad Ambiental en PM 2,5 y azufre, motivo suficiente para poner en alarma a la ciudad (MITMA, 2015).

Con los resultados de esta investigación se busca sustentar con base la contribución de aerosoles que tiene las quemas de biomasa, y lo que como consecuencia nos trae, para así poder tomar medidas preventivas futuras apoyadas con otros estudios.

## **1.4. HIPÓTESIS Y DESCRIPCIÓN DE VARIABLES**

### **1.4.1. HIPÓTESIS**

#### **1.4.1.1. Hipótesis General**

**H<sub>i</sub>:** Existe una influencia de los aerosoles atmosféricos generados por la quema de biomasa, a través de su EOA, en el forzamiento radiativo terrestre.

**H<sub>0</sub>:** No existe una influencia de los aerosoles atmosféricos generados por la quema de biomasa, a través de su EOA, en el forzamiento radiativo terrestre.

#### **1.4.1.2. Hipótesis Específicas**

a) **H<sub>i</sub>:** Se identifican los aerosoles generados por la quema de biomasa a través de su clasificación en base a sus propiedades ópticas y microfísicas.

**H<sub>0</sub>:** No se identifican los aerosoles generados por la quema de biomasa a través de su clasificación en base a sus propiedades ópticas y microfísicas.

- b) **H<sub>i</sub>**: Existe relación significativa entre los datos de AERONET y MODIS por lo que es posible seleccionar óptimos casos de estudio.  
**H<sub>0</sub>**: No existe relación significativa entre los datos de AERONET y MODIS por lo que no es posible seleccionar óptimos casos de estudio.
- c) **H<sub>i</sub>**: Con el modelo SBDART se determinó que sí existe forzamiento radiativo en Huancayo.  
**H<sub>0</sub>**: Con el modelo SBDART se determinó que no existe forzamiento radiativo en Huancayo.

## 1.4.2. VARIABLES

### 1.4.2.1. V1

Aerosoles atmosféricos

### 1.4.2.2. V2

Forzamiento radiativo

## 1.5. OPERACIONALIZACIÓN

Tabla 1.  
Operacionalización de las variables.

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
<b>Vi:</b> Aerosoles atmosféricos	Se definen como un grupo de partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire con tamaños que oscilan entre 0,01 a 10 $\mu\text{m}$ , que pueden permanecer en la atmósfera durante al menos unas horas.	Aerosoles atmosféricos provenientes de la quema de biomasa.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Espesor óptico de aerosol.</li> <li>✓ Propiedades microfísicas (El Coeficiente de Angstrom y el EOA).</li> <li>✓ Retro trayectoria de partícula en caso de una detección de un nivel alto de AOD.</li> </ul>
<b>Vd:</b> Forzamiento Radiativo	Cambio en la irradiancia neta vertical (expresada en $\text{Wm}^{-2}$ ) en la tropopausa, debido a un cambio interno o un cambio en el forzamiento externo del sistema climático.	Forzamiento radiativo originado a causa de los aerosoles atmosféricos en Huancayo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Modelación de la interacción de los aerosoles con la radiación en diversas longitudes de onda mediante el modelo SBDART.</li> </ul>

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA**

##### **2.1.1. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS**

El artículo científico realizado por Jesús Santamaría (2010), que tiene como título “Forzamiento Radiativo y cambios químicos en la Atmósfera”, con el objetivo de conocer las causas fisicoquímicas generales del calentamiento global y el cambio climático. Su enfoque se basa en una explicación sobre las conexiones y correlaciones entre los incrementos de las concentraciones de gases de efecto invernadero y los aerosoles, en el incremento del calentamiento global debido a un aumento de la temperatura superficial. Como resultado llegó a la conclusión que es evidente la coincidencia entre las temperaturas observadas y la predicha en los modelos que incorporan el incremento de gases de efecto invernadero, por lo que existe un 90% de probabilidad que la causa del calentamiento observado sea provocado por estos gases, estiman también un calentamiento para finales del siglo con una elevación de temperatura de 3 grados Kelvin equivalente a 0,011°C. Cabe resaltar que una de las fuentes de incertidumbre para este trabajo son las limitaciones en la comprensión de los mecanismos de retroalimentación, dentro de estos, el efecto de los aerosoles y cambios en el albedo. Concluye que inevitablemente el cambio climático permanecerá durante los próximos años. Este artículo respalda la presente tesis ya que evidencia la influencia de los gases del efecto invernadero en el forzamiento radiativo, dando cabida a la posible influencia de los aerosoles, dejando dicho punto como incertidumbre. Sin embargo, es

antecedente importante para la comprensión de las variaciones de flujo neto de energía radiativa.

El artículo científico de Suazo (2013), que tiene como título “Determinación del espesor óptico de aerosol en la Estación Antártica Peruana de Machu Picchu” para la revista Apuntes de Ciencia y Sociedad, tuvo el objetivo de determinar el EOA durante los meses de enero de 2007, 2008 y febrero de 2013 en la Estación Científica Antártica Machu Picchu (ECAMP) con una metodología descriptiva – comparativa. Como resultado de esta investigación se determinó la máxima y mínima media del EOA con magnitudes de 0,1061 y 0,616. Determinó el coeficiente de correlación del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) en sus plataformas Aqua y Terra (550 nm) con el fotómetro solar SP02 (a 500 nm), cuyos valores fueron de 0,0284 y 0,0059 ( $p < 0,05$ ; para los cálculos estadísticos utilizó la prueba de Pearson. De la misma manera fue evaluada la correlación del fotómetro solar SP02 a 500 nm con el Índice de Aerosol del sensor Ozone Monitoring Instrument (OMI) a 360 nm, con un mejor resultado en este último caso. Concluye entonces que los datos que se obtuvieron en la ECAMP en los años 2007, 2008 y 2013, no evidencian una variación significativa del espesor óptico de aerosoles respecto a otras estaciones como las de Aboa y Neumayer. Entre otros factores, puede deberse a la obtención manual de los datos de ECAMP a diferencia de los otros que son automáticos, además de la influencia de las sales marinas al ECAMP por encontrarse ubicada en una zona costera. El artículo realizado por Suazo es de gran aporte para la primera parte de esta investigación, al utilizar data de MODIS y un fotómetro solar. De esta manera, podemos comparar el coeficiente de correlación obtenido por Suazo y el que se calculará en adelante, utilizando el fotómetro recientemente instalado en el Observatorio de Huancayo, además de ver la evolución del EOA a través de los años y evaluar posibles causas.

El artículo científico de Suarez, y otros (2006), que tiene como título “Estudio de la variación estacional de ozono troposférico y aerosoles del Perú relacionado a las quemadas de vegetación en la Amazonía”, cuyo objetivo fue evidenciar del transporte transfronterizo de contaminantes del aire desde Brasil hacia el Perú. Utilizó datos satelitales para la cuantificación y evaluación de la influencia de los mismos en la composición química de la atmósfera en la región peruana. Se emplearon datos de los satélites Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) y MODIS, para evaluar y cuantificar la variación estacional de los contaminantes del aire tales como el ozono troposférico y los aerosoles, en las variables de Índice de aerosol (IA) y el EOA. El

instrumento que utilizaron para las mediciones satelitales fue el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) a bordo del satélite NOAA-12, para la determinación de focos de incendio en la región de Brasil. En el caso del análisis del ozono troposférico el método empleado fue el “cloud slicing” a partir de los datos generados por el sensor TOMS, versión 8, a bordo del satélite Earth Probe. Para el análisis estadístico de los datos se empleó el programa R (The R Foundation for Statistical Computing Version 2.1.1, 2005). Las conclusiones evidenciaron el transporte transfronterizo de contaminantes del aire en la Amazonía del Perú debido a la quema de biomasa en Brasil, detectando valores máximos de aerosoles en los meses de agosto y noviembre. Como parte de los resultados obtenidos se recomienda estudiar más a fondo las trayectorias de las masas de aire en la cuenca del Amazonas, una investigación en la composición química de los aerosoles y una implementación de políticas de prevención de incendios forestales coordinadas entre Perú y Brasil. Este antecedente prueba el viaje transfronterizo de los aerosoles desde Brasil y nos da una data en la que especifica dos meses como picos, lo que nos da una guía de investigación, además será de gran soporte en los resultados que se obtengan.

El artículo científico de Vivanco Cristobal (2014), titulado “Variabilidad temporal de aerosoles atmosféricos en Huancayo”, para la revista Apuntes de Ciencia y Sociedad, tuvo como objetivo el de identificar la variabilidad temporal de los aerosoles atmosféricos en Huancayo a través de datos satelitales. El método de la investigación empleado fue de alcance descriptivo y diseño longitudinal. Así mismo, los datos utilizados fueron el Índice de Aerosoles (IA) en el período 2005-2012, tomado del sensor OMI y el EOA registrados por el sensor MODIS de las plataformas Aqua y Terra, en el período 2003-2012 y 2001-2012, respectivamente. Al finalizar el estudio se pudo identificar un patrón de variación significativo entre las estaciones del año y los meses analizados para ambos parámetros. Para invierno y otoño, elevados valores de IA obteniendo los máximos en agosto. Respecto al EOA, se registraron máximos en septiembre. Para la variabilidad mensual fue observado que, en enero, febrero y marzo, el EOA 550 nm aumenta, y para abril, mayo y junio, disminuye. En el caso de julio, agosto y septiembre vuelve a aumentar, y finalmente, para octubre, noviembre y diciembre, otra vez disminuye. Motivo por el cual estos eventos podrían deberse al incremento de contaminantes en la Amazonía, dentro de cuyos factores podría encontrarse la quema de biomasa. Este antecedente brinda un gran soporte a la investigación porque evidencia la

variación de EOA para las estaciones, destacando valores altos para otoño e invierno, que se espera poder corroborar.

### **2.1.2. TESIS DE INVESTIGACIÓN**

La tesis de investigación de Torres Ramírez (2013), titulada “Determinación del coeficiente de turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) en todo el ancho de la banda del espectro solar para la localidad de Chapinero, Bogotá, Colombia”, para optar al título de Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente en la Universidad de Manizales, facultad de Ingenierías, en Bogotá, D.C., Colombia. El objetivo general de este trabajo fue determinar mediante el modelo matemático de Lambert-Beer el coeficiente de turbiedad atmosférica ( $\beta$ ), como indicador de la carga de aerosoles en la columna vertical atmosférica para la localidad de Chapinero en la ciudad de Bogotá, para establecer una comparación entre esta zona y la de Nemocón, considerada con atmósfera limpia (2011 y 2012). Utilizó el método de cálculo del coeficiente de turbiedad realizando mediciones simultáneas de Radiación Solar directa, medida con un pirheliómetro y variables meteorológicas. Al finalizar el estudio determinaron el comportamiento de la turbiedad atmosférica para los años 2007 y 2012, indicando que existía una ligera tendencia al incremento de la turbiedad atmosférica hacia el año 2012 en Chapinero. También determinaron que el nivel promedio de material particulado (PM10) fue  $37,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ubicando de esta manera a dicha localidad dentro de la primera categoría de riesgo para la salud por la mencionada concentración. De este estudio se desprendieron dos resultados de gran importancia: el primero, una alta correlación ( $R = 0,9295$ ) entre los niveles de material particulado inhalable (PM10) y el número de pacientes con enfermedades respiratorias en el hospital de Chapinero E.S.E.; el segundo, que la población más vulnerable a la contaminación atmosférica fueron los niños en edad pre-escolar, con una cifra significativamente superior al resto de las edades analizadas (42,5%) del total de pacientes que presentaban enfermedades respiratorias. Con apoyo de esta tesis se pudo comprender de mejor manera el EOA, el Coeficiente de Angstrom y de qué manera interactúan estos con la radiación en su paso por la atmósfera.

La tesis de investigación de Estevan Arredondo (2009), titulada “Efecto Radiativo de la nube de aerosoles del monte Pinatubo sobre el Gran Caribe”, para optar al grado científico de Doctor en Ciencias Meteorológicas en el Instituto de Meteorología de Cuba. Cuenta con diversos objetivos, dentro de ellos la validación

de las mediciones del lidar de Camagüey, empleando información de satélite, determinación de la forma de entrada de la información de aerosoles en un modelo de transferencia radiativa, la cuantificación del forzamiento radiativo provocado por la nube de aerosoles estratosféricos del Monte Pinatubo sobre Cuba, la determinación de las respuestas de las diferentes bandas espectrales ante la presencia de aerosoles estratosféricos de sulfato, y finalmente, simular el efecto radiativo de posibles súper-erupciones con consecuencias severas sobre la radiación solar. Los datos de aerosoles estratosféricos se obtuvieron a partir de mediciones realizadas con el lidar de Camagüey y estas han sido validadas con el instrumento satelital SAGE II (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II). Al finalizar el estudio los resultados obtenidos confirmaron que el forzamiento radiativo en la banda del IR cercano contribuye sustancialmente al calentamiento total de la estratosfera luego de erupciones volcánicas intensas. El calentamiento de la estratosfera y el enfriamiento de la tropósfera en Cuba fueron evidenciados a lo largo de su estudio, debido a la influencia de la nube de aerosoles del Pinatubo. También se demostró que, respecto al comportamiento diurno de las perturbaciones sobre el flujo neto, el mayor forzamiento se da en las mañanas y en las tardes cuando la altura del sol sobre el horizonte y el camino óptico son inversamente proporcionales. Finalmente, como una gran contribución de esta investigación, el investigador Estevan recomienda brindar esta información a Defensa Civil de Cuba para que dentro de las posibles catástrofes puedan incluir la denominación de “Disminución prolongada de la radiación solar que alcanza la superficie terrestre”. Esta investigación nos da antecedentes de que efectivamente hay una influencia de los aerosoles en el forzamiento radiativo. Aunque estos aerosoles no sean causados por la quema de biomasa, la metodología y estrategias de tratamiento y procesamiento de datos utilizados son de vital importancia para el desarrollo de la presente tesis al tomarlos como referencia.

### **2.1.3. ARTÍCULOS DE DIVULGACIÓN**

En el artículo presentado por Alisson (2014), a la Agencia FAPESP, titulado “La deforestación de la Amazonía incrementa la contaminación en países de América del Sur”, informa acerca de la situación que se vive en América del Sur, indicando que Brasil es el principal exportador de aerosoles generados por la quema de biomasa a los países vecinos de Perú, Paraguay y Bolivia. Estos 4 países son los

principales emisores de este tipo de aerosoles, registrando la mayor cantidad de focos de incendio. Indica además que las plumas de humo llegan a cubrir áreas de hasta 5 millones de kilómetros cuadrados. Este artículo es un gran soporte en el sentido de que los aerosoles que afectan e influyen en el forzamiento radiativo en Huancayo, no son solo aquellos generados en el país.

El artículo periodístico presentado por Mitma (2015) al diario CORREO, lleva como título “Contaminación en Huancayo supera los niveles permitidos por el Estándar de Calidad Ambiental”. En dicho artículo se presenta información del monitoreo de aire del 2014 en Huancayo. Los resultados obtenidos muestran que en la ciudad de Huancayo se superan los Estándares de Calidad Ambiental de aire en PM 2,5 y azufre. En el caso de PM 2,5 lo permitido es de  $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; sin embargo, Huancayo registra  $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Lo permitido para el azufre es de  $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y lo registrado fue  $33\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esta información alerta a toda la población y más aún a los investigadores, su aporte en esta investigación recae en la evidencia de estado de la contaminación atmosférica en la ciudad de Huancayo.

## **2.2. BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

#### **2.2.1.1. Clasificación de los Aerosoles Atmosféricos**

Los aerosoles atmosféricos pueden ser clasificados de diversas maneras, entre ellas:

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

La clasificación de aerosoles de acuerdo a su origen marino, continental, polvo, mezcla, contaminado y biomasa, se da en función a su Coeficiente de Angstrom y EOA (Hess, y otros, 1998) (Holben, y otros) (Dubovik, y otros, 2002).

El clima puede verse influido por los aerosoles de manera directa o indirecta, es decir, si el aerosol dispersa o absorbe la radiación ésta se

considerará una influencia directa. Mientras que, si el aerosol interviene en las nubes como núcleo de condensación o modificando, sus propiedades ópticas o tiempos de vida se considerará una influencia indirecta.

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. (Díaz Rodriguez, 2006)

Los aerosoles atmosféricos varían de manera significativa en la tropósfera, tanto en cantidad como en composición por regiones. Su tiempo de vida es muy corto, siendo este desde unos minutos hasta unas semanas, ello se debe a los procesos físico-químicos y dinámicos que existen en esta capa de la atmósfera y a la gran variedad de tamaños de partículas y composición química de los mismos. Por otra parte, en la estratósfera predominan procesos dinámicos horizontales y debido a esto el tiempo de vida de los aerosoles es mayor (hasta 2 años), además presentan mayor homogeneidad química y espacial. (Estevan Arredondo, 2009)

#### **2.2.1.2. Caracterización de los Aerosoles**

- **Caracterización Óptica**

Tanto la dispersión como la retrodispersión van en función a la relación del radio de la partícula y la longitud de onda. 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 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. (Díaz Rodriguez, 2006)

Esta función se encuentra normalizada a 1 y se cumple que:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{P(\cos\theta)}{4\pi} \sin\theta d\theta d\varphi = 1$$

Para la caracterización óptica de los aerosoles, además de la función fase, se encuentran otras propiedades que permiten realizar dicho objetivo, estas son:

**1. Factor de asimetría:** Es calculado obteniendo el promedio del coseno del ángulo de dispersión, se considera como el primer momento de la función fase e indica la dirección de la dispersión.

$$g(\lambda) = \frac{\int \cos\theta \cdot p(\lambda, \theta) d(\cos\theta)}{\int p(\lambda, \theta) d(\cos\theta)}$$

Se considera que la dispersión es hacia adelante cuando el factor de asimetría 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. (Sobrino, 2001)

**2 Albedo de simple dispersión:** Es la razón entre el espesor óptico de dispersión y de extinción. Este parámetro indica el porcentaje de luz que es dispersada en una dispersión simple lo que representa la capacidad absorbente del aerosol, si su valor calculado es 0 se refiere a partículas muy absorbentes, por el contrario, si su valor es 1, corresponde a partículas poco absorbentes. (Díaz Rodríguez, 2006) (Cortés Hernández, 2014).

**3 Coeficiente de extinción:** Este es un parámetro que indica cuan fuertemente es absorbida la luz a una determinada longitud de onda. (Cortés Hernández, 2014)

### **Dispersión de radiación solar por la atmósfera terrestre:**

La dispersión es el fenómeno producido al interactuar una onda electromagnética con una partícula para producir una reemisión de la energía incidente en todas las direcciones del espacio de manera continua, siendo así que las partículas atmosféricas pueden ser asemejadas a fuentes de radiación difusa. La intensidad relativa disminuye con la longitud de onda, por lo que depende del cociente entre este y el tamaño de las partículas. Por ejemplo, si las partículas son pequeñas en relación a la longitud de onda, éstas tienden a dispersar la misma cantidad de energía tanto hacia adelante como hacia atrás, pero si las partículas son mayores o comparables a la longitud de onda, la dispersión se da en la misma dirección en la que se propaga la radiación incidente.

Se pueden resaltar dos tipos de dispersión: la dispersión Rayleigh que es dominante en las partes altas de la atmósfera y se da cuando las partículas son mucho más pequeñas que la longitud de onda ( $x \ll 1$ ), y la dispersión Mie si las partículas son mayores o comparables ( $x \geq 1$ ) y se producen en las capas bajas de la atmósfera. (Díaz Rodríguez, 2006)

### **Absorción de Radiación Solar:**

Se entiende por absorción como 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 cuáles 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 dinitrógeno, el oxígeno, el metano y el nitrógeno. Otros absorbentes, aunque en menor medida, son los óxidos de nitrógeno y las combinaciones de hidrocarburos.

Por lo tanto, se puede decir que la extinción de la radiación debida a los aerosoles es la suma de la dispersión más la absorción. (Torres Ramírez, 2013)

- **Caracterización Física**

Para la comprensión de la caracterización física es necesario conocer la distribución global de los aerosoles, dentro de esto su estimación en relación a sus fuentes de emisión y producción de aerosoles.

La distribución de los aerosoles en la tropósfera se da de modo heterogéneo, por los cambios físicos, químicos y posterior eliminación de estos en esta capa de la atmósfera.

De fuentes naturales la estimación realizada en unidades de 10<sup>9</sup> Kg/año (Mt/año) es:

- Degradación de suelos (100 – 500)
- Quema de biomasa (3-150)
- Producción en la superficie del mar (300)
- Productos volcánicos (25-150)
- Conversión de gas a partículas (20-430)

De fuentes antropogénicas la estimación realizada en unidades de 10<sup>9</sup> Kg/año (Mt/año) es:

- Emisión directa de partículas (10 – 90)
- Conversión de gas a partículas (Sulfatos desde SO<sub>2</sub> 130-200/Nitratos desde NO<sub>x</sub> 30-35)
- Hidrocarburos (15-90)

De fuentes extraterrestres la estimación realizada en unidades de 10<sup>9</sup> Kg/año (Mt/año) es de 0,5 a 50.

La atmósfera se encuentra compuesta por diversas capas (tropósfera, estratósfera, mesósfera, termósfera y exósfera), sin embargo, los estudios realizados presentan resultados de la distribución vertical de los aerosoles sobre la tropósfera y la estratósfera. Es así que en la alta tropósfera el valor constante es de 60 y 600 partículas/cm<sup>3</sup>, pero el número de partículas sobre la tropopausa (zona de transición entre la tropósfera y la estratósfera) tiene grandes incertidumbres. Las partículas entre 0,1 y 1µm decrecen en la tropósfera hasta 10 – 20 partículas/dm<sup>3</sup> y

en la baja estratósfera (a 15 – 25 km) poseen una concentración entre 50 y 200 partículas/dm<sup>3</sup> (Cadle, 1976).

Finalmente, cabe mencionar que el tiempo de vida de los aerosoles en la atmósfera se encuentra también en función a su tamaño y el carácter higroscópico.

### **2.2.1.3. Determinación del Espesor Óptico de los Aerosoles**

Para el estudio de componentes atmosféricos, ya sean aerosoles, ozono, vapor de agua, oxígeno u otros, mediante medidas radiométricas, es necesario basarse en la comparación entre el espectro de la radiación solar directa en la superficie de la tierra y el espectro solar extraterrestre, pudiendo encontrar variaciones por la dispersión y absorción de las moléculas.

La Ley de Beer-Bouguer-Lambert permite calcular la atenuación debida a la dispersión siempre referida a una atmósfera plano-paralela de una sola capa y se encuentra expresado de la siguiente manera:

$$I = I_0 \cdot e^{-\tau m}$$

Dónde: I es la irradiancia medida a nivel del suelo, I<sub>0</sub> es la irradiancia extraterrestre, τ es el espesor óptico total de la atmósfera (espesor de toda la columna atmosférica) y m es la masa óptica, que se define como la razón entre el espesor óptico en la vertical y el espesor óptico en una dirección determinada.

Para calcular el espesor óptico de la atmósfera se utiliza la medida directa al sol (medida de extinción) por lo que si se asume un plano paralelo la masa óptica se puede expresar en función del ángulo cenital solar (m=secθ) fórmula que deja de ser una buena aproximación a partir de 60° en el ángulo cenital solar.

Para obtener el espesor óptico de aerosoles a partir de la Ley de Beer Bouguer Lambert, la ecuación empleada es la siguiente:

(Toledano Olmeda, 2005)

$$\tau = -\frac{1}{m} \ln(I/I_0)$$

#### 2.2.1.4. Forzamiento Radiativo por Aerosoles

Es una perturbación en las tasas de calentamiento radiativo atmosférico y los flujos de radiación de onda larga neta en la superficie, causada por los aerosoles. 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. (Stenchikov, y otros, 1998)

En el informe presentado por el IPCC (IPCC, 2007) se manifiesta que 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 atmósfera a escala regional, afectando así al perfil de temperatura vertical y a la circulación atmosférica a gran escala.

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

Existen dos tipos de forzamiento: el **forzamiento radiativo positivo**, aquel que contribuye al calentamiento de la superficie de la tierra, y el **forzamiento radiativo negativo** que favorece a su enfriamiento. (Stenchikov, y otros, 1998)

- **ATENUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR**

La atmósfera recubre toda la tierra y al ser esta una envoltura gaseosa, la radiación solar extraterrestre la atraviesa antes de llegar a la superficie terrestre y se producen diversos efectos como los cambios en la irradiancia solar total, debido a variaciones internas de la actividad solar y la modificación de la composición de la atmósfera, en este último caso, debido al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero o por la emisión de otros componentes o partículas sólidas.

Es por ello que se habla de atenuación solar, ya que la radiación al atravesar la atmósfera se ve sometida a este proceso, que depende a su vez, de la longitud del camino recorrido y de la altura y posición del sol.

La radiación solar llega en forma de radiación directa y difusa, que conforman a su vez, la radiación solar global.

La radiación solar que llega a la superficie terrestre no se mantiene constante, ya que varía en función a las condiciones geográficas y climáticas, como es el caso de las nubes que pueden llegar a anular la radiación directa en días nublados o la propia presencia de aerosoles. (Torres Ramírez, 2013)

## **2.2.2. METODOLOGÍAS EXISTENTES**

### **2.2.2.1. Fotómetro Solar CIMEL CE-318**

Pertenece a la Aerosol Robotic Network (AERONET) y es coordinada por la National Aeronautic and Space Administration (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 empleando fotómetros solares del tipo CIMEL CE 318.

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. Los algoritmos de procesamiento han evolucionado desde la versión 1.0 a la versión 2.0 (totalmente liberados en julio de 2006) y están disponibles en los sitios web AERONET y PHOTONS (NASA, 2015).

Estos fotómetros realizan una caracterización de los aerosoles en la columna atmosférica, derivado del EOA en 440, 500, 670, 870 y 1020 nm. Luego de utilizar un algoritmo de inversión se obtienen las diversas propiedades de los aerosoles. Al contar con diversos puntos alrededor del planeta, proporciona una cobertura global con datos que servirán para realizar validaciones de productos atmosféricos obtenidos por sensores

a bordo de satélites, además de contribuir a establecer una climatología global sobre aerosoles atmosféricos.

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, tal cual son obtenidos.
- 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 pues se les ha aplicado un proceso de pos calibración.

El fotómetro solar CIMEL CE-318, 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 agua precipitable (Cortés Hernández, 2014). Para el EOA es necesario un algoritmo de deconvolución en el cual se discriminan los espesores ópticos gruesos y finos en una longitud de onda de 500nm (O'Neill, y otros, 2003). Los algoritmos de inversión se utilizan para la distribución del tamaño, la función fase y el espesor óptico (Dubovik, y otros, 2000).

La selección de las longitudes de onda con las que mide 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 (NASA, 2015).

En la ciudad de Huancayo el Fotómetro Solar CIMEL CE-318 fue instalado el 19 de marzo de 2015 en el Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR) del Observatorio de Huancayo. Los datos que se obtienen son enviados y procesados en tiempo real en los

servidores de la NASA. Esto se desarrolló en convenio con el IGP (Instituto Geofísico del Perú).

#### **2.2.2.2. MODIS**

(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Espectroradiómetro de imágenes de moderada resolución, instrumento científico lanzado en órbita terrestre a bordo del satélite Terra (EOA AM) en diciembre del 1999 y en mayo del 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 cruzando por el 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 cruzando 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 minutos aproximadamente, realizando 16 órbitas por día. La órbita va cambiando cada día, pero se repite cada 16 días.

Los datos que brinda este instrumento 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 (NASA, 2015).

Consta de un sistema óptico con un telescopio afocal 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 que abarca desde 0,4 hasta 14,4  $\mu\text{m}$ .

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  $\mu\text{m}$ ). Las primeras 19 bandas abarcan la región del espectro electromagnético situada entre 0,405 y 2,155  $\mu\text{m}$ , mientras que las bandas de la 20 a la 36 cubren la parte del infrarrojo térmico del espectro, de 3,660 a 14,385  $\mu\text{m}$ . 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  $\mu\text{m}$ ) son las que se utilizan para obtener productos de aerosoles.** En el Anexo 1 se muestra en detalles, la descripción de todas las bandas espectrales (Gonzales, 2013).

### **2.2.2.3. ACRESP**

Teledetección de composición atmosférica y predicción (Atmospheric Composition Remote Sensing and Prediction por sus siglas en inglés) a través de esta plataforma web se obtienen los datos de emisiones del inventario de fuegos del NCAR (National Center for Atmospheric Research). Cabe resaltar que ACRESP conecta las observaciones satelitales y modelos químicos para así mejorar las predicciones de calidad de aire (University Corporation for Atmospheric Research) (UCAR, 2015). Los datos de ACRESP se emplean para las corridas del WRF-CHEM, ya que constituyen, junto a los datos de salida del Global Forecast System (GFS), los datos de entrada para este modelo. Los datos de ACRESP empleados corresponden a las emisiones de material particulado kg PM10/día para cada foco detectado durante un día.

### **2.2.2.4. Tipos de Modelos Atmosféricos**

#### **A) MODELO HYSPLIT**

El modelo Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory fue desarrollado en 1982 por Ronald Draxler de la Administración Nacional de Océanos y Atmósfera (NOAA). Este modelo se emplea para determinar 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. (Noaa, 2015) (Draxler, y otros, 1997) (Draxler, y otros, 1998) (Draxler, 1999)

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, la cual 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 (Vivanco Moreno, y otros, 2007).

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.

Este modelo se puede ejecutar de forma interactiva en la Web a través del sistema READY (Noaa, 2015) o puede descargarse a una PC, pero en este caso, el usuario debe obtener sus propios archivos de datos meteorológicos. (Draxler, y otros, 2015) (ROLPH, 2015)

## **b) MODELO SB DART**

Por sus siglas en inglés, Santa Bárbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer. Este es un modelo numérico que simula los procesos físicos que tienen lugar en la atmósfera. Fue desarrollado por la Universidad de California Santa Bárbara, 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 tierra. (Richiazzi, y otros, 1998)

Este modelo realiza cálculos basándose principalmente en los perfiles de presión, temperatura, cantidad de humedad y ozono en la atmósfera. Adicionalmente se pueden agregar otros parámetros como cantidad de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ) (Saavedra Huanca, y otros, 2009).

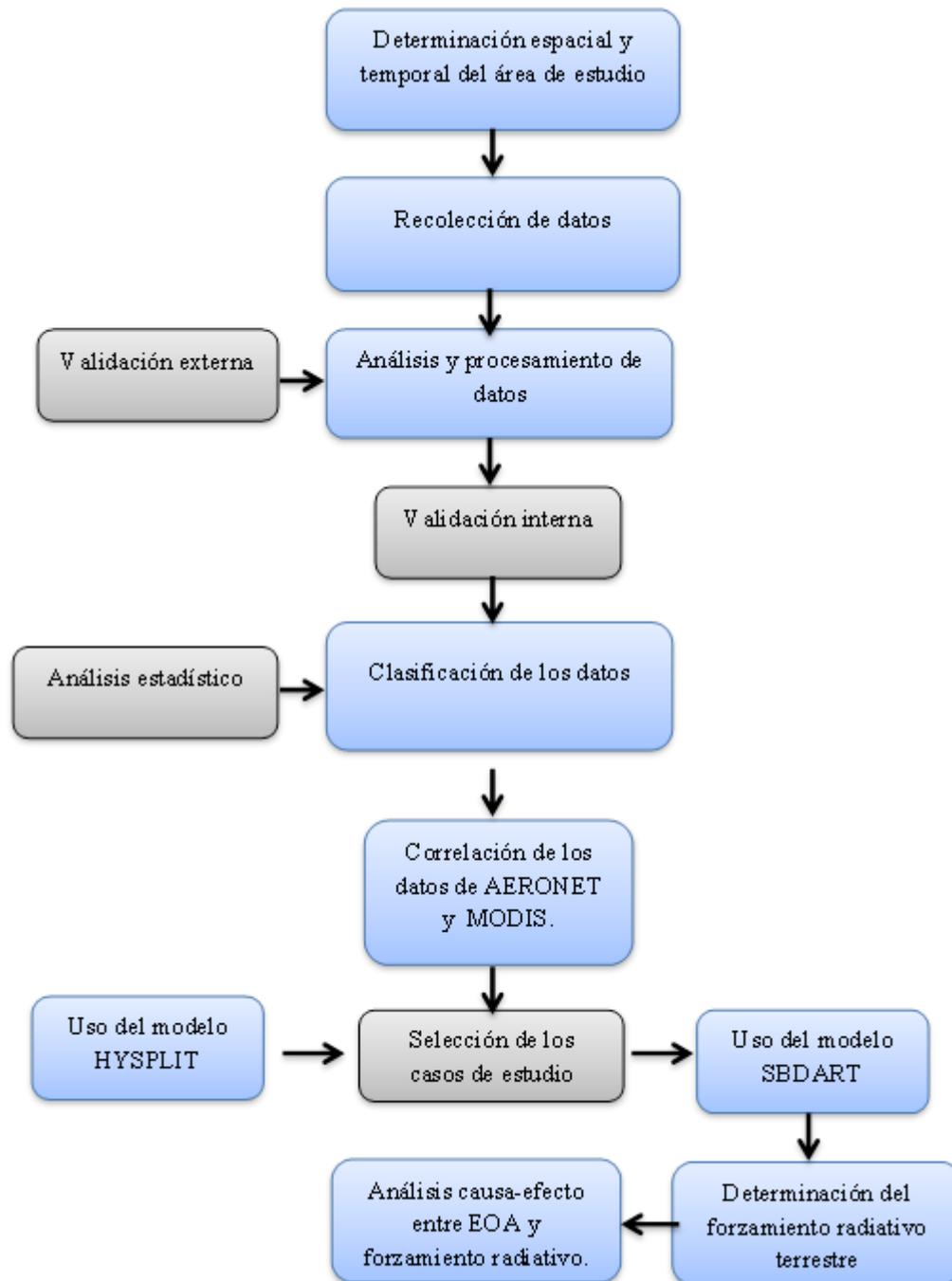
### **c) MODELO WRF-CHEM (Weather Research and Forecasting model with Chemistry)**

Desarrollado con la finalidad de acoplar el modelado de procesos químicos y meteorológicos en un sistema único de coordenadas horizontales y espaciales (Grell, y otros, 2005). Con este modelo se pueden acoplar diversos procesos físico-químicos como el transporte, la deposición, emisión, transformación química, interacción de aerosoles, procesos de fotólisis, transferencia radiativa, etc., debido a su estructura modular (Peckman, y otros, 2010).

El WRF-CHEM puede ser utilizado para cualquier punto del planeta, pero para esto, fue necesario extender su uso con una estructura equivalente para dicho fin. En el caso del hemisferio sur, se corrigió un cálculo de la proyección tipo Lambert-Conformal, se modificó la estructura de especiación química logrando que el usuario defina el tipo y número de especies químicas, entre otras modificaciones.

Al permitir la interacción de la meteorología con los procesos químicos y considerando que es precisamente esto lo que sucede en la atmósfera real, el modelo permite explicar episodios pasados, analizar las emisiones actuales y realizar pronósticos de calidad de aire. (Moya Álvarez, y otros, 2016) (Fernández, y otros, 2010)

### 2.2.3. MODELO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN



Mediante la Tabla 2, Se presenta la validación de datos utilizada en esta investigación:

**Tabla 2.**  
**Modelo teórico de investigación**

<b>Variable</b>	<b>Validación de los datos</b>	<b>Procesamiento de la información</b>	
Aerosoles atmosféricos	<p>La recolección de los datos se dio durante el 2015 (Marzo – Diciembre) del fotómetro solar CIMEL-CE318 y del espectroradiómetro MODIS a bordo del satélite Aqua para fechas seleccionadas después de un análisis estadístico.</p> <p>La validación externa de AERONET y MODIS corresponden a los algoritmos y factor de corrección a cada calibración anual del instrumento.</p> <p>Mientras que la validación interna corresponde a la validación de los datos de MODIS</p>	<p>Para la clasificación de aerosoles se utilizó Matlab, y para su análisis se utilizó estadística descriptiva a través de las medidas de tendencia central y de variación.</p> <p>Se realizaron gráficos mensuales del porcentaje de cada tipo de aerosol.</p> <p>Para la determinar la relación entre los datos de MODIS y AERONET se utilizó estadística descriptiva, haciendo una correlación.</p>	<p>Se utilizó la prueba t para dos muestras emparejadas para conocer la influencia de los aerosoles atmosféricos en el forzamiento radiativo terrestre.</p>

	con los de AERONET.		
Forzamiento radiativo terrestre	Fue calculado mediante el modelo SBDART, con datos de inversión de los aerosoles atmosféricos, espesor óptico y Coeficiente de Angstrom. Las salidas del modelo nos dieron flujos ascendentes y descendentes, con lo que se determinó el forzamiento radiativo. La validación del cálculo parte de la validación externa e interna de los datos de los aerosoles, ya que son a partir de estos datos que se calcula el forzamiento radiativo.	Se realizaron gráficos lineales para observar el comportamiento del forzamiento radiativo.	

Fuente: Elaboración propia 2016.

### 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS:

- **Radiación solar:** Es la radiación emitida por el sol. También se denomina radiación de onda corta. La radiación solar tiene una gama específica de longitudes de onda determinado por la temperatura del sol (IPCC, 2008).
- **Radiación infrarroja:** Radiación emitida por la superficie de la tierra, la atmósfera, y las nubes. Es conocida también como radiación terrestre o de onda larga. La radiación infrarroja tiene una gama de longitudes de onda que es más larga que la longitud de onda del color rojo en la parte visible del espectro. El espectro de la radiación infrarroja es diferente al de la radiación solar o de onda corta, debido a la diferencia de temperatura entre el sol y el sistema tierra-atmósfera. (González Arias, 2001).
- **Irradiancia:** Es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. Su unidad de medida, de acuerdo al sistema internacional, es en  $W/m^2$ . (IPCC, 2008)
- **Albedo:** Es el poder que tiene cada cuerpo para reflejar la radiación que recibe, este alcanza el valor de 1 cuando toda la radiación se refleja, y el valor de 0 cuando toda la radiación es absorbida. (Torres Ramírez, 2013)
- **Balance de energía:** Se refiere a la cuantificación de todos los aportes y pérdidas de energía. Puede ser de origen radiativo en ondas cortas y largas; de origen turbulento, ligada al movimiento de la atmósfera y del cambio de fase del agua o de origen conductivo (conducción del calor en el suelo). (Torres Ramírez, 2013)
- **Contaminación atmosférica:** Acumulación de concentración de contaminantes del aire, esta comienza con la emisión de gases a la atmósfera. En primer lugar, se da la contaminación difusa y luego la localizada. La primera refiere que no tiene un foco localizado y la segunda se encuentran localizadas y pueden ser cuantificadas. (Gallego Pico, y otros, 2012)
- **Material particulado:** Se utiliza este término para referirse a partículas sólidas de dimensiones y orígenes diferentes, que por lo general permanecen suspendidas en un gas como la atmósfera durante algún tiempo. (Torres Ramírez, 2013)
- **Carbono negro:** Especie de carbono definida en base a la medida de absorción de luz y reactividad química y/o estabilidad térmica. Consiste en carbón vegetal, hollín y/o materia orgánica que puede ser refractaria. (IPCC, 2008)

- **Emisiones:** Se entiende por emisiones la liberación de gases y aerosoles a la atmósfera, en una zona y un período de tiempo específicos. (IPCC)
- **Propiedades microfísicas:** Características microfísicas del aerosol siendo estas partículas con un diámetro menor a 10µm. Dentro de las características tenemos; densidad, índice de refracción, Coeficiente de Angstrom, entre otros. (Alegría Campo, 2015)
- **Aerosoles:** Se definen como las partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire con tamaños promedios que oscilan entre 0,01 a 10 µm, que pueden permanecer en la atmósfera durante al menos unas horas (IPCC). El estudio de los aerosoles en la atmósfera va desde los procesos básicos de interacción con la radiación solar, el forzamiento radiativo, hasta el análisis de su impacto climático y los problemas de contaminación atmosférica. (Toledano Olmeda, 2005)
- **Coeficiente de Angstrom:** Coeficiente 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 puro) y 0,20 (cielo contaminado), sirve para describir la forma espectral del espesor óptico de los aerosoles utilizando su dependencia con la longitud de onda. Angstrom (1929 – 1964) propuso una expresión parametrizada, válida para un cierto rango espectral, que es:

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

Dónde:  $\lambda$  es la longitud de onda en  $\mu\text{m}$ ,  $\alpha$  el parámetro o exponente de Angstrom (relacionado con el tamaño de aerosol) y  $\beta$  es una constante con el espesor óptico correspondiente a 1  $\mu\text{m}$ . Teóricamente el parámetro alfa puede tomar valores entre 0 y 4. Los valores más 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. (Toledano Olmeda, 2005) (Wagner, y otros, 2008)

- **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 tropósfera (a 12 000 msnm aproximadamente) como resultado de cambios internos en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte externo de energía solar, expresado en  $\text{W}/\text{m}^2$  (Stenchikov, y otros, 1998). 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). Este normalmente 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” (IPCC, 2008).

- **Radiación Solar Directa:** Se denomina radiación solar directa a aquella que alcanza la superficie de la tierra sin haber cambiado el ángulo de dirección en su paso por la atmósfera y se recibe sobre una superficie normal a la propagación del rayo solar. Este tipo de radiación puede ser medida con el instrumento “piranómetro espectral, actinómetro o pirheliómetro” permitiéndonos conocer la cantidad de energía solar que llega a la superficie terrestre. (Torres Ramírez, 2013)
- **Radiación Solar Difusa:** Es aquella que llega a la superficie terrestre procedente de toda la bóveda celeste después de haber cambiado su ángulo de dirección por la interacción física de la energía del sol con las sustancias constituyentes de la atmósfera. Esta interacción está dada por los procesos físicos de dispersión y absorción. Al igual que en el caso de la radiación directa, esta energía se mide con el instrumento “piranómetro”, pero en este caso lleva una banda especial que hace sombra al transductor de este instrumento. (Torres Ramírez, 2013)
- **Radiación Solar Global:** Compuesta por la radiación directa y difusa. Su medición se realiza con el piranómetro, pero a cielo despejado, en cualquier condición climática e indica la cantidad de radiación solar que está llegando, pudiendo ser esta directa y/o indirecta a la superficie terrestre. (Torres Ramírez, 2013)
- **Deconvolución:** Operaciones y ecuaciones matemáticas empleadas para recuperar datos que han pasado por diversos cambios luego de un proceso físico. (Días Martín, 1994)

## CAPÍTULO III METODOLOGÍA

### 3.1. MÉTODO Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1.1. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

##### A. Método general o teórico de la investigación

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizó como método general el deductivo-analítico; ya que, se inició con una observación general del panorama actual de la zona de estudio, dentro de ello el espesor óptico de aerosoles y las quemas de biomasa, identificando así particularidades en la situación merecedoras de un análisis mayor. A través del análisis se logró establecer la relación causa-efecto entre nuestras variables utilizando estadística descriptiva e inferencial que sustentó nuestros resultados.



## **B. Método específico de la investigación**

Los métodos específicos utilizados fueron: Primero, determinación espacial y temporal del área de estudio identificando las variables; segundo, la recolección de datos de las fuentes de AERONET y MODIS; tercero, un análisis y procesamiento de los datos seguidos de una validación interna ligada al uso de la estadística para seleccionar casos de estudio puntuales y determinar la relación causa-efecto entre el EOA y el forzamiento radiativo, cumpliendo así con los objetivos de la investigación.

Los pasos que se siguieron fueron:

1. Recolectar datos de AERONET; para esto se determinó que se hará un análisis de los datos de marzo a diciembre del 2015. La descarga se hizo a través de la página web de AERONET (NASA, 2015), seleccionando Huancayo-IGP y el nivel 1.5.
2. Clasificar los datos, seguido de una estadística descriptiva para determinar los meses con mayor influencia de las quemas de biomasa en el porcentaje total de aerosoles registrados por mes. Ello a través de un script realizado en Matlab presentado en el anexo 13, con especificaciones detalladas para su clasificación y análisis estadístico básico. Finalmente, seleccionar fechas con mayor porcentaje de aerosoles de origen de quema de biomasa para tomar como referencia en la descarga de datos de MODIS.
3. Descargar datos de MODIS desde su página web (NASA, 2015), clasificar los aerosoles con los mismos parámetros escogidos en la clasificación de aerosoles de AERONET, a través de un script en Matlab, anexo 15.
4. Calcular el coeficiente de correlación entre los datos de AERONET y MODIS para determinar el nivel de relación entre estas fuentes.
5. Identificar las fechas de correlación más alta entre los datos de AERONET y MODIS para seleccionar casos de estudios puntuales.
6. Corroborar dicha información con retro trayectorias usando el modelo HYSPLIT en su versión en línea, y superponer a mapas con focos de incendio en el Perú. Estos se obtienen de ACRESP y se usa un script en Matlab para su gráfico y estadística básica.

7. Utilizar el modelo SBDART para obtención de los valores de flujo neto ascendente y descendente en el tope de la atmósfera y la superficie terrestre para el cálculo del forzamiento radiativo terrestre.
8. Realizar una prueba t para medias de dos muestras emparejadas con la finalidad de identificar la influencia del EOA en el forzamiento radiativo.
9. Aceptar o rechazar las hipótesis planteadas.

### **3.1.2. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **a) Tipo de investigación**

El tipo de investigación son aquellos que pueden identificarse tomando en cuenta el propósito dirigido a la resolución de un problema o a los objetivos de la investigación; conforme a esto, el presente estudio se tipifica de la siguiente manera:

- Por su finalidad es aplicada, porque busca mejorar el conocimiento de la sociedad sobre temas específicos, y en este caso, el desarrollo en las ciencias atmosféricas en la ciudad de Huancayo. Además, se basó en estudios previos aplicados a este en el proceso de investigación.
- Por su alcance
  - i. Temporal, es seccional porque el estudio se desarrollará en un tiempo específico o único.
  - ii. De la Investigación, Descriptivo – Correlacional, considerando que se empezó con un nivel descriptivo dado que se recolecta información de las variables y se requiere hacer un análisis correlacional, ya que se asocian variables, mediando un patrón predecible para un grupo o población, en ese sentido, en este proyecto se correlacionan los datos de AERONET y MODIS y se realiza una regresión entre el EOA y el forzamiento radiativo para concluir en el nivel de influencia, y dar respuesta a nuestro problema. La validación de datos externa, corresponde a algoritmos de inversión, deconvolución y otros realizados por la NASA previos a poner los datos a disposición del investigador. La validación interna se da a través de análisis estadístico, de observación y analíticos. (Hernandes, y otros, 2007).

- Por sus fuentes es primaria, ya que la información tiene un origen de fuentes primarias, mas no de otros trabajos derivados a este.
- Por su carácter es cuantitativa, pues se aplicarán diversas técnicas que se estudiarán de manera cuantitativa.

b) Nivel de investigación:

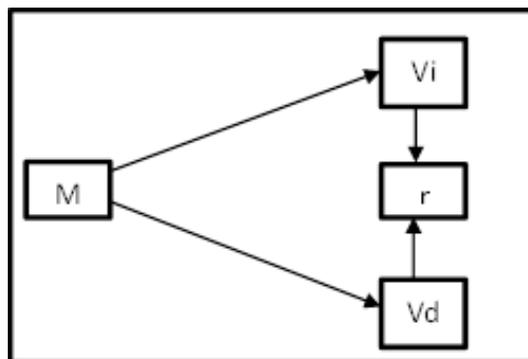
El nivel de estudio de la presente investigación corresponde al Descriptivo – Correlacional

### 3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de investigación que se utilizó fue no experimental, porque las variables no fueron manipuladas directamente.

#### 3.2.1. TIPO DE DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Transaccional correlacional, siendo que, de los datos recolectados y posterior análisis y procesamiento de datos, se busca la relación entre las variables para la solución al problema de la tesis.



M = Efecto de los aerosoles atmosféricos sobre el forzamiento radiativo en Huancayo.

Vi = Variable Independiente: Aerosoles atmosféricos generados por la quema de biomasa.

Vd = Variable Dependiente: Forzamiento radiativo en la ciudad de Huancayo.

r = Relación entre variable independiente y variable dependiente.

### **3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA**

#### **a) Población**

La población está constituida por los aerosoles atmosféricos en la ciudad de Huancayo.

#### **b) Muestra**

Se seleccionó una muestra no probabilística por conveniencia, ya que de acuerdo a las características y fines que persigue la investigación, se tomarán para el estudio los aerosoles atmosféricos registrados en el período marzo – diciembre de 2015.

Dichos aerosoles atmosféricos son clasificados en marino, continental, polvo, mezcla, contaminado y biomasa, de los cuales algunos fueron excluidos y otros incluidos en base a lo siguiente:

#### **Criterios de inclusión**

Al ser nuestro objetivo principal, evaluar la influencia de los aerosoles atmosféricos a partir del estudio de su espesor óptico, generados por la quema de biomasa, en el forzamiento radiativo para la ciudad de Huancayo, debemos incluir por conveniencia los aerosoles de biomasa y contaminado, este último debido a que dentro de este grupo también se encuentran aerosoles generados por la quema de biomasa.

#### **Criterios de exclusión**

En base a nuestro objetivo, debemos excluir por conveniencia los aerosoles de tipo marino, continental, polvo y mezcla.

### **3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

#### **3.4.1. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron cuatro técnicas que son: La recopilación de datos, el procesamiento de datos, el uso de modelos atmosféricos y el tratamiento estadístico para validar la información y los resultados obtenidos.

### 3.4.2. INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LA RECOLECCIÓN DE DATOS:

Los instrumentos utilizados para las técnicas de recolección se muestran en la Tabla 3:

**Tabla 3.**  
**Instrumentos y técnicas de recolección de datos.**

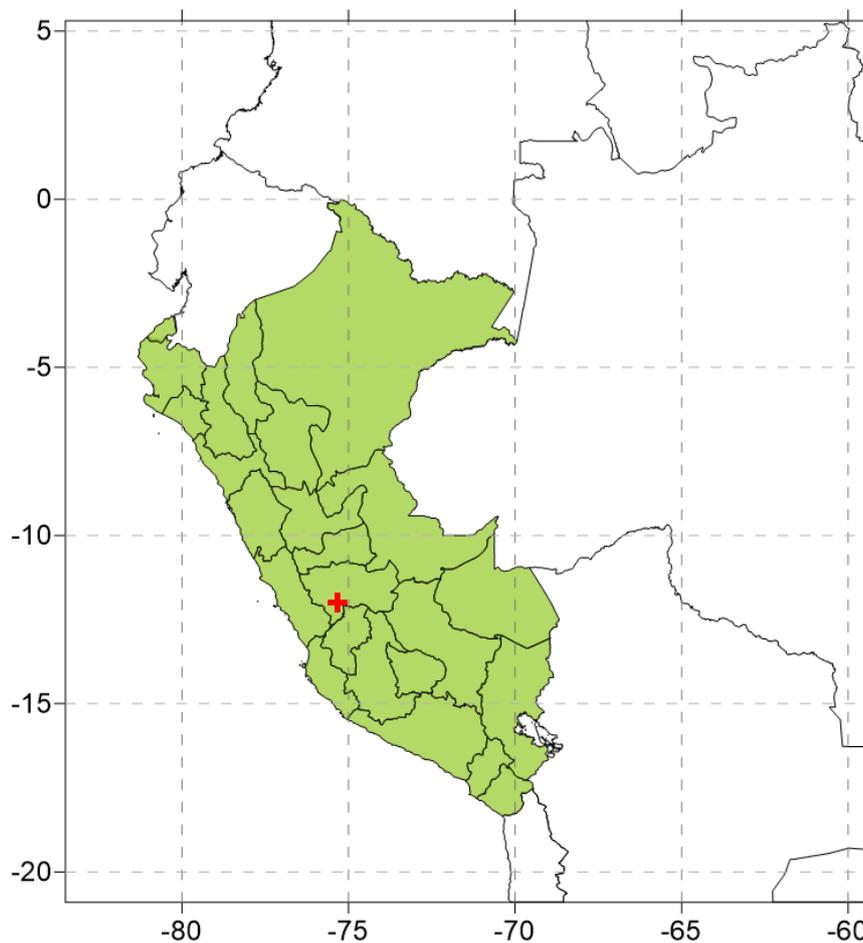
<b>Técnica</b>	<b>Instrumento</b>
Recolección de datos	-Fotómetro solar CIMEL CE 318  -Espectroradiómetro MODIS a bordo del satélite Aqua.  -Plataforma web ACRESP para la obtención de datos de emisiones del inventario de fuegos NCAR.
Procesamiento de datos	-Matlab, a través de la elaboración de scripts específicos para AERONET, MODIS, y ACRESP.
Modelamiento	-Modelo HYSPLIT en su versión en línea (para retro trayectorias).  -Modelo SBDART (para la determinación del flujo neto).
Tratamiento estadístico	-Estadística descriptiva e inferencial.

Fuente: Elaboración propia 2016.

### 3.5. ÁREA DE ESTUDIO

Se consideró la ciudad de Huancayo como área de estudio. El punto tomado como referencia fue la Estación del Huayao del IGP, ubicado en el Observatorio de Huancayo, con las coordenadas de -12,04 (latitud) y -75,32 (longitud), a una altura de 3352 m.s.n.m., correspondiente al punto en el cual se encuentra el fotómetro solar CIMEL CE318.

**Figura 1.**  
**Área de trabajo seleccionada con la ubicación del fotómetro solar en el Observatorio de Huancayo, perteneciente al IGP.**



Fuente: Elaboración propia 2016.

### **3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y TRATAMIENTO DE DATOS**

#### **3.6.1. MATLAB (MATRIX LABORATORY)**

Este programa es empleado para realizar diversos cálculos numéricos, resaltando su aplicabilidad con vectores y matrices; puede trabajar con números escalares (reales o complejos) con cadenas de caracteres u otras estructuras de información más complejas. Tiene un lenguaje de programación propia.

- Matlab puede realizar gráficos en 2 o 3 dimensiones. Trabaja en las siguientes áreas: álgebra lineal numérica, procesamiento de señales (análisis, comprensión de datos, entre otros), diseño de sistemas de control, salidas gráficas, estadística, simulación de sistemas dinámicos.

- Para el desarrollo de este proyecto el Matlab ha sido empleado para elaborar los programas que permitirán el procesamiento de los datos que se van recolectando. De esta forma se realizarán los análisis estadísticos en función de las propiedades físicas de los aerosoles. Se analizarán igualmente casos de estudios que resulten de interés para la investigación.
- Se han desarrollado los scripts para el procesamiento de los datos de AERONET, MODIS, ACRESP y los valores de salida de los modelos de HYSPLIT y SBDART.

### **3.6.2. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE AERONET**

Para este trabajo se realiza una descarga mensual de los datos de EOA en el nivel 1.5 que corresponde a aquellos sometidos al filtrado de datos con nubes. No se han utilizado datos de nivel 2.0, que sería lo recomendable, pues para ello se requiere de un año después de la instalación para la respectiva calibración. El fotómetro solar fue instalado en el Observatorio de Huancayo el 19 de marzo de 2015.

Al obtener los datos, estos pasan por un procesamiento en Matlab y posterior análisis para determinar los días que serán casos de estudio. El script elaborado para este caso establece condiciones para la clasificación y análisis de los datos. Se escogió la longitud de onda de 440 nm, ya que es donde se tiene una mejor respuesta de los aerosoles. La clasificación se realizó teniendo en cuenta los criterios expresados por diferentes autores:

(Hess, y otros, 1998) (Holben, y otros) (Dubovik, y otros, 2002)

1. Marino: Con un Coeficiente de Angstrom mayor a 0 y menor o igual a 1,2; EOA mayor a 0 y menor o igual a 0,153.
2. Continental: Con un Coeficiente de Angstrom mayor a 1,2; EOA mayor a 0 y menor o igual a 0,153.
3. Polvo: Con un Coeficiente de Angstrom mayor a 0 y menor o igual a 1,02; EOA mayor a 0,153.
4. Mezcla: Con un Coeficiente de Angstrom mayor a 1,02 y menor o igual a 1,5; EOA mayor a 0,153.
5. Contaminado: Con un Coeficiente de Angstrom mayor a 1,5; EOA mayor a 0,153 y menor o igual a 0,38.

6. Biomasa: Con un Coeficiente de Angstrom mayor a 1,5; EOA mayor a 0,38.

Al correr matlab con el script respectivo, este arroja un análisis estadístico que incluye: el total de casos de estudio, media, máximo, mínimo, desviación estándar, casos válidos y casos no válidos. También se obtienen los gráficos de dispersión que refieren al EOA vs el Coeficiente de Angstrom, porcentaje de cada tipo de aerosoles presentes, distribución por fechas y longitud de onda (440 nm). Finalmente, se generan los ficheros correspondientes a cada tipo de aerosol los cuales contienen información sobre la fecha, hora, valores de EOA y Coeficiente de Angstrom. Este procedimiento se muestra en los anexos 12 y 13.

Después del procesamiento y posterior clasificación de aerosoles, se seleccionaron potenciales posibles casos de estudio en base al análisis del diagrama presentando todos los valores de EOA y sus respectivas fechas, considerando que serán aquellos con un valor superior al de 0,153 correspondiente a la clasificación de contaminado y biomasa, vinculados ambos a la quema de vegetación, objeto de estudio de esta investigación.

Posterior a ello, en base a los casos de estudio, se realiza la descarga de los datos de inversión correspondientes. De estos se seleccionan el coeficiente de extinción, el factor de asimetría y el albedo de simple dispersión. Estos datos, además el EOA y Coeficiente de Angstrom, serán utilizados en el modelo SBDART para el cálculo del forzamiento radiativo.

### **3.6.3. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE MODIS**

El sensor MODIS en las plataformas de Aqua y Terra proporciona, entre otros, el EOA que permitirá identificar los componentes atmosféricos que contribuyen a la atenuación de la radiación solar.

Para este trabajo se realizó la descarga de datos de la plataforma web de la NASA. Esta descarga corresponde a los posibles casos de estudio en base a AERONET, un análisis de mapas de focos de incendio obtenidos por ACRESP y concentraciones de PM10 (datos obtenidos por el modelo WRF-CHEM). Estos dos últimos puntos serán detallados más adelante. Es así que las fechas seleccionadas en base a la clasificación y análisis de los datos de AERONET fueron:

- Agosto: 26 – 31
- Setiembre:
  - 02
  - 10 – 19
  - 24 – 26
- Octubre:
  - 12 – 15

Estas fechas corresponden a los días que se registraron máximos valores de EOA (al menos mayores a 0,153 de la clasificación contaminado y biomasa), lo que pudo ser analizado en base a la estadística descriptiva de tendencia central y varianza en la clasificación de aerosoles realizada.

La plataforma utilizada fue Aqua, Nivel 2 (L2) correspondiente a la colección 5,1. Las coordenadas que enmarcan la región de estudio para la descarga de datos fueron:

- Norte: 5,3°
- Sur: -20,9°
- Oeste: -83,5°
- Este: -59,5°

Todos los productos MODIS se encuentran en el formato HDF (Hierarchical Data Format) y la nomenclatura utilizada para identificarlos está estandarizada por la NASA; esto permite conocer a qué plataforma pertenece, el nombre del producto, fecha de adquisición (año y día en el año), versión y fecha de procesamiento. Ejemplo:

### **MYD\_L2.A2015267.1735.051.2015272195307**

- Las 3 primeras letras “MYD” se refieren a la plataforma. Esto quiere decir MOD = Terra; MYD = Aqua y MCD para datos combinados de ambas.
- A continuación “L2” se refiere al tipo de producto.
- “A2015267” hace referencia al año y día en el año de la adquisición de la imagen.
- MODIS cuenta con un sistema de proyección sinusoidal, motivo por el que “1735” se refiere a la rejilla de la imagen, en este ejemplo sería 17 horizontal y 35 vertical).
- “051” está relacionado con la versión de procesamiento o colección.
- Los últimos números son la fecha de procesamiento: año, día en el año, hora, minuto y segundos).

Al obtener los productos solicitados de MODIS se procede, mediante un script desarrollado en Matlab, a su procesamiento. Este script fue elaborado estableciendo parámetros que permitirán obtener el EOA de cada fichero de MODIS, definido con un criterio espacio-temporal. El criterio espacial establecido fue de 50 km y en el caso temporal aquellas que se encuentren en torno a las 24 horas. Se obtiene entonces el total de días analizados, las fechas correspondientes, el tiempo de procesamiento, ficheros de los casos coincidentes con las especificaciones dadas y la media respectiva del EOA. Además, se obtienen gráficos de la distribución y la concentración de los aerosoles (con su respectiva clasificación). Dicho procedimiento se muestra en los anexos 14 y 15.

Con el valor medio obtenido se realiza una comparación entre los datos de MODIS y AERONET para seleccionar los casos de estudio definitivos.

#### **3.6.4. PROCESAMIENTO DE FOCOS DE INCENDIO USANDO ACRESP PARA SU COMPARACIÓN CON LAS CONCENTRACIONES DE PM10 (WRF-CHEM)**

Se emplea la plataforma ACRESP para recolectar la data necesaria y ubicar los focos de incendio geográficamente en el área de estudio. Estos datos son procesados en Matlab para la obtención de las imágenes requeridas y ficheros con

información de los focos totales dentro de los 50 km, los focos de incendio totales en el Perú y emisiones promedio. Tanto las emisiones como los focos se dan para cada día. Esto posteriormente será comparado con los gráficos de las concentraciones de PM10 obtenidas mediante las salidas del modelo WR-CHEM. Se realiza con el fin de vincularlos mediante Matlab, con las retro trayectorias (que se realizarán con el modelo HYSPLIT) para los casos de estudio seleccionados. Con esto se podrá corroborar que los aerosoles provienen de la quema de biomasa indicando que su origen es coincidente al de algún foco de incendio.

### **3.6.5. MODELO HYSPLIT**

Anteriormente se ha explicado cómo es el funcionamiento de este modelo, para este estudio se ha trabajado con la versión online. Los datos meteorológicos de entrada, por lo tanto, están dispuestos de manera automática por el modelo online.

Los datos que se han ingresado para iniciar las retro trayectorias fueron la latitud y longitud del fotómetro ubicado en el Observatorio de Huancayo, estas son:  $-12,04^{\circ}$  y  $-75,32^{\circ}$ , respectivamente. Se selecciona la semana en la que se registró el caso a estudiar, la fecha y hora (UTM) exacta, desde donde se desea iniciar. El tiempo de retro trayectoria elegido es de 72 horas. Las salidas generadas por el modelo contemplarán las alturas de 500, 1500 y 3000 metros sobre el nivel del suelo (m.s.n.s). En esta región de la atmósfera los aerosoles varían significativamente, tanto en cantidad, como en composición, por regiones. El transporte puede abarcar desde 1 km hasta unos pocos cientos de kilómetros de distancia.

De esta manera se obtiene la retro trayectoria para cada nivel y en google earth para poder ver el origen exacto. Se extrajeron las coordenadas de la retro trayectoria, siendo estas posteriormente procesadas por Matlab, para analizar la relación con los focos de incendios, superponiendo en los mapas de focos de incendio, con las quemadas de biomasa. El procedimiento se muestra en el anexo 16.

### **3.6.6. MODELO SBDART**

Para poder utilizar el modelo, se tuvo que compilar el programa (código fuente del modelo) en Linux, para poder hacer las respectivas corridas. Fue necesario parametrizar el modelo en base a los datos que se obtuvieron y otros datos estandarizados. El modelo presenta variables de entrada y salida. Dentro de las

variables de entrada se utilizaron el EOA, el Coeficiente de Angstrom, longitud de onda, coeficiente de extinción, albedo de simple dispersión y factor de asimetría. Todos estos datos fueron obtenidos a través del fotómetro solar CIMEL CE-318T, para los días que han sido seleccionados como casos de estudio. Se calculó el día en el año, para los casos de estudio, es decir, el valor obtenido, contando desde el 1 de enero a cada fecha seleccionada.

Respecto a las horas en las cuales se decidió correr el modelo, se seleccionaron las 14:00 UTM, el cenit (hora a la cual el sol se encuentra en el punto más alto de su elevación sobre el horizonte) y las 20:00 UTM.

Se tomaron los valores del EOA para la longitud de onda de 500 nm, siendo esta una especificación del modelo.

En el anexo 2 se muestra el código fuente del script desarrollado para generar el fichero de entrada del modelo. En la primera parte se encuentran definidas una serie de variables, algunas de las cuales se tomarán por defecto, como es el caso de "isat" que corresponde al tipo de función del filtro. Otras tomaron el valor de la atmósfera estándar, como es el caso del perfil atmosférico. El modelo usa la atmósfera estándar US62 (RICCHIAZZI, 2002), donde el vapor de agua es de 1,418 g/cm<sup>2</sup>, el ozono total de 0,349 atm-cm y el ozono total por debajo de 10 km de 0,0252 atm-cm. La atmósfera estándar fue realizada para un escenario de aire limpio, con constituyentes principales próximos al nivel del mar. En la siguiente parte se especifican los días en que se requiere correr el modelo, la hora y sus respectivas coordenadas. Para el caso del albedo ("isalb"), el modelo define valores de acuerdo al tipo de superficie, en este caso, el fotómetro solar se encuentra ubicado en Huayao – Huancayo, área en la cual predomina la vegetación, siendo por tal motivo que se utilizó el "Albedo de vegetación" representado por el valor 6, valor que puede ser observado en el anexo 17.

En la siguiente parte se ingresan los datos de EOA, Coeficiente de Angstrom, que van a variar para cada día y hora. Se ingresan también el Coeficiente de Extinción, el albedo de simple dispersión y el factor de asimetría en sus promedios diarios para cada longitud de onda.

Se corrió el modelo para calcular el forzamiento radiativo y las salidas cubren desde 0,300 hasta 1,300µm (región solar del espectro), cada 0,01 µm.

En la Tabla 4 se muestran los datos que se ingresaron al modelo para cada día y por horarios, así como, aquellos que se calcularon como valores medios diarios para ser empleados en los tres horarios. El término “TBAER” corresponde al EOA, “ABAER” es el Coeficiente de Angstrom, “WLBAER” la longitud de onda, “QBAER” el coeficiente de extinción, “WBAER” el albedo de simple dispersión, y finalmente, “GBAER” corresponde al factor de asimetría.

Para calcular el forzamiento radiativo terrestre fue necesario correr el modelo dos veces para cada hora, de cada día; la primera corrida se realizó en condiciones no perturbadas o de cielo claro, o sea, sin la presencia de nubes ni aerosoles, con una visibilidad de 20 km, es decir, una atmósfera completamente limpia. Para la segunda corrida se ingresaron los valores de la tabla anterior, a los que se denominará como atmósfera perturbada por la presencia de aerosoles. Teniendo ambos valores, se podrá ver que tanto influyeron los aerosoles por la quema de biomasa en el forzamiento radiativo.

Para el cálculo del forzamiento radiativo se tuvo en cuenta lo siguiente:

- Flujo descendente (FD)



- Flujo ascendente (FA)

El flujo neto fue calculado para cielo claro (FNcc) y para la atmósfera perturbada por la presencia de aerosoles (FNaer), la diferencia de estos es, finalmente, el forzamiento radiativo (FRA) causado por la presencia de aerosoles generados por la quema de biomasa, como se muestra en la siguiente expresión:

$$FRA = FNaer - FNcc$$

**Tabla 4.**

**Parámetros de los aerosoles que constituyen las variables de entrada para SBDART, para cada día analizado y los tres horarios empleados. El valor entre paréntesis en la columna Día, corresponde al valor del día consecutivo dentro del año.**

Día	Hora	TBAER	ABAE R	WLBA ER	QBAE R	WBAE R	GBAE R
<b>14</b>	14	0,1001	1,5411	440	0,1488	0,9742	0,6463
<b>(257)</b>	17	0,1029	1,8785	675	0,0792	0,9663	0,6104
	20			870	0,0558	0,9618	0,6125
				1018	0,0465	0,9604	0,6202
<b>16</b>	14	0,0970	1,7660	440	0,1274	0,8876	0,6589
<b>(259)</b>	17	0,0721	1,6145	675	0,0572	0,8541	0,5714
	20	0,1024	1,7184	870	0,0371	0,8260	0,5395
				1018	0,0290	0,8072	0,5356
<b>17</b>	14	0,1632	1,7971	440	0,2087	0,9063	0,6587
<b>(260)</b>	17	0,1104	1,7736	675	0,0938	0,8818	0,5750
	20	0,1859	1,5846	870	0,0591	0,8532	0,5415
				1018	0,0458	0,8354	0,5326
<b>19</b>	14	0,2744	1,8251	440	0,3451	0,9576	0,6770
<b>(262)</b>	17	0,1844	1,8037	675	0,1647	0,9372	0,5758
	20	0,2467	1,5943	870	0,0988	0,9191	0,5253
				1018	0,0724	0,9076	0,4997
<b>25</b>	14	0,1283	1,7846	440	0,1461	0,9679	0,6427
<b>(268)</b>	17	0,1063	1,8119	675	0,0668	0,9564	0,5663
	20	0,0954	1,7629	870	0,0400	0,9477	0,5208
				1018	0,0290	0,9416	0,5009

**Fuente: Elaboración propia 2016.**

Los resultados obtenidos fueron procesados en Matlab para obtener gráficos que representen el forzamiento radiativo para cada longitud de onda. Esto fue calculado para el tope de la atmósfera (TOA) y para superficie (SRF), ya que estos aerosoles provocarán un forzamiento radiativo diferente en la superficie y en el tope de la atmósfera por la influencia que causará la absorción y dispersión.

### **3.6.7. PROGRAMAS DE TRATAMIENTO ESTADÍSTICO**

Se utilizó Microsoft Excel para el tratamiento estadístico y comparación (correlación de ser necesario) de los datos de MODIS y AERONET. Para ello se utilizó los datos de los ficheros luego del procesamiento con Matlab, se seleccionaron las horas coincidentes para cada día, se calculó la media y esta fue comparada. Se realizó una correlación en los días con menos diferencia, y fueron estos, finalmente, los seleccionados para su estudio en HYSPLIT y SBDART.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

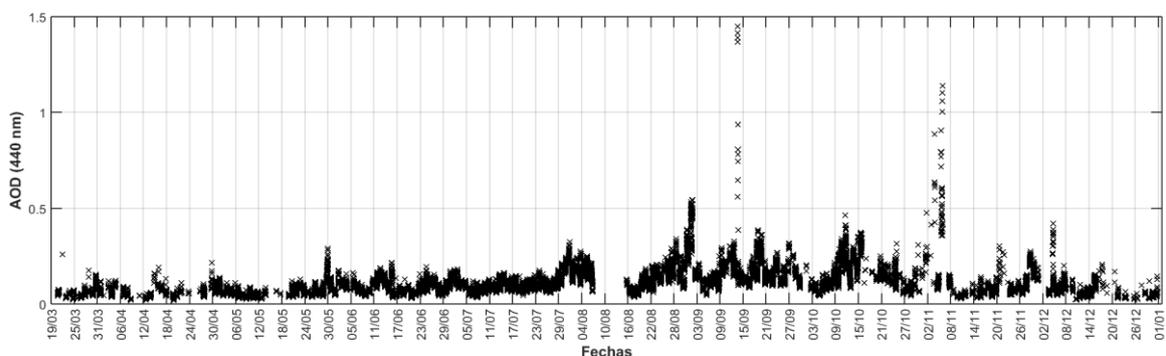
#### 4.1. RESULTADOS DEL TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

##### 4.1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS AEROSLES ATMOSFÉRICOS EN HUANCAYO

###### 4.1.1.1. Clasificación de los datos de AERONET

Los datos de AERONET han sido descargados diariamente y agrupados mensualmente para un mejor análisis. En la siguiente figura se representan todos los valores de EOA registrados para el período marzo-diciembre de 2015. Para el análisis de los datos por cada mes, se presentará un análisis estadístico y un gráfico circular para que se pueda tener una mejor visión, entendimiento e interpretación al respecto.

**Figura 2.**  
**Valores de EOA registrados durante el 2015.**



Fuente: Elaboración propia 2016.

En el capítulo II del marco teórico, punto 2.2.1.1. Clasificación de aerosoles de acuerdo al Coeficiente de Angstrom y espesor óptico de aerosoles, se presentaron los fundamentos en los cuales se basa la clasificación de aerosoles que en este trabajo se presenta. Así mismo, en el capítulo III, punto 3.5 Técnicas de tratamiento y procesamiento de datos, se detalla la manera en la que se realizó el script para procesar los datos en Matlab, donde se pueden apreciar los rangos empleados para cada tipo de aerosoles, en función al Coeficiente de Angstrom y el EOA. Para esta clasificación se han seleccionado colores específicos, los cuales serán empleados en los gráficos que se presentarán a partir de este momento. En la siguiente tabla se muestran los colores asignados a cada tipo de aerosol.

**Tabla 5.**  
**Selección de colores de acuerdo a la clasificación de los aerosoles.**

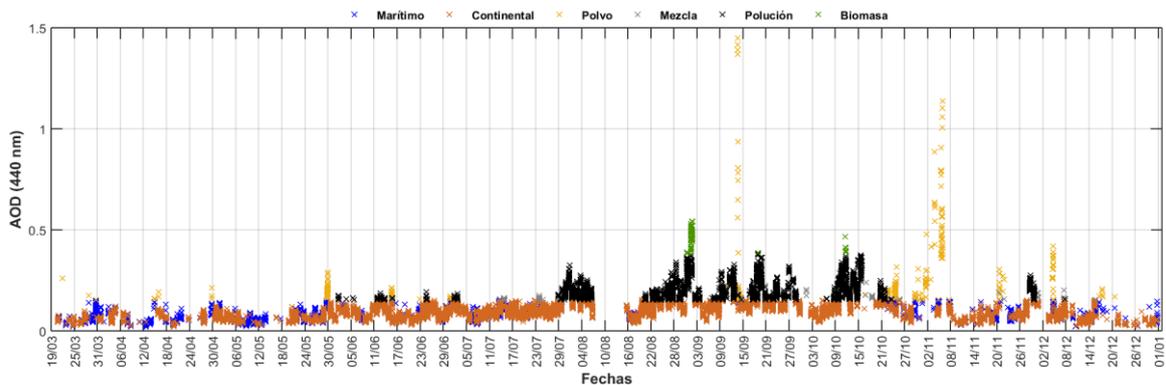
<b>Clasificación</b>	<b>Color</b>
Marino	
Continental	
Polvo	
Mezcla	
Contaminado	
Biomasa	

**Fuente: Elaboración por (Estevan Arredondo, 2009).**

En la Figura 2 se representa el EOA para todo el período, pero luego de realizada la clasificación antes mencionada. De esta forma se puede apreciar claramente el período de mayor presencia de aerosoles originados por la quema de biomasa (color negro y verde). Este período se inicia a finales del mes de julio y se extiende hasta finales del mes de octubre para el año 2015. Se pueden apreciar casos aislados de aerosoles por quema de biomasa en el mes de junio, pero estos no tienen valores significativos de EOA. En análisis realizados con el número de focos para este mes (junio), se puede apreciar que el número de focos

en la región de estudio es escaso, en comparación con el período antes mencionado (julio-octubre), como se mostrará más adelante.

**Figura 3.**  
**Distribución del EOA en el 2015, de acuerdo a la clasificación de los diversos tipos de aerosoles.**



**Fuente:** Elaboración propia en base a los datos de AERONET 2016.

Se considerará como casos de estudio aquellos valores de EOA que sobrepasen la magnitud de 0,153 y que correspondan a aerosoles por la quema de biomasa o contaminado. Se considerarán también los valores que estén dentro de la clasificación de contaminado, ya que el tamaño de estas partículas, así como, sus propiedades ópticas, coinciden con las partículas generadas por la quema de biomasa.

A continuación, se realizará un análisis para cada mes del 2015, atendiendo a la clasificación realizada para los aerosoles registrados por el fotómetro solar del Observatorio de Huancayo.

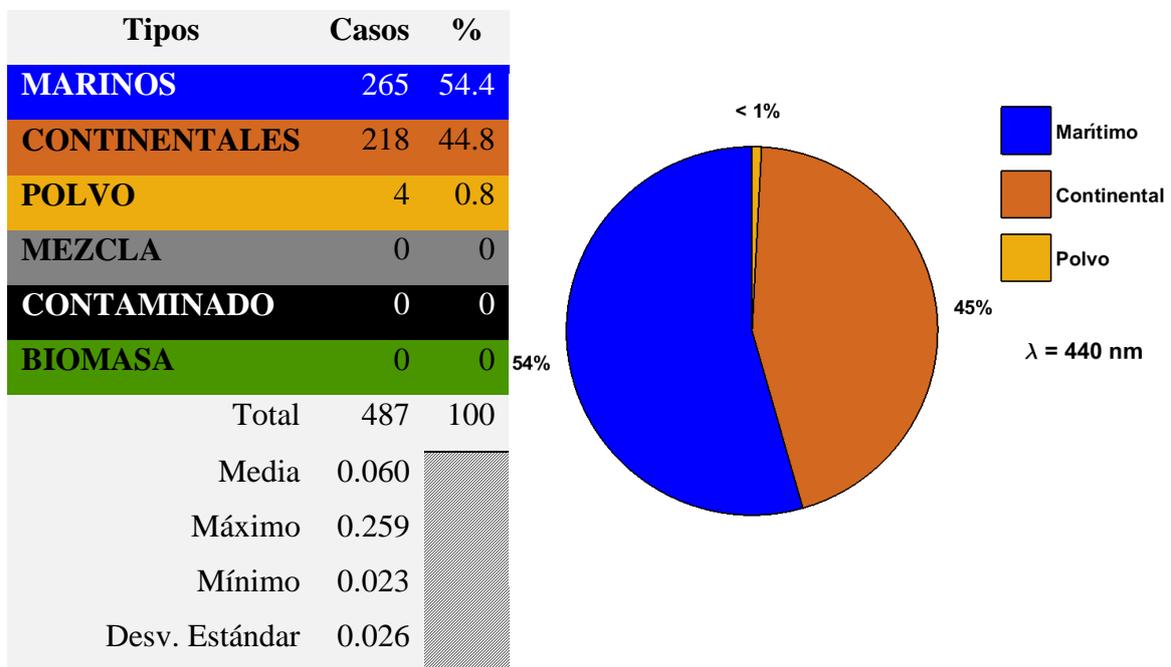
#### **4.1.1.1.1. 19 marzo – 31 marzo**

Como se ha mencionado anteriormente, el fotómetro solar fue instalado en Huancayo el 19 de marzo de 2015. Es por ello que en este primer mes los datos comienzan a partir de esta fecha.

Para este mes hubo un mayor porcentaje de aerosoles marinos con 54,4% y una presencia casi nula en aerosoles contaminados y de biomasa, que son la materia de investigación, como se puede apreciar en

la Figura 4. En este mes hubo 2 casos no válidos, considerados como no válidos, cuando el Coeficiente de Angstrom es menor que cero. De esta manera en el mes de marzo, de acuerdo a los datos de AERONET, se puede asumir que probablemente no hubo actividad de quema de biomasa o al menos, que dichas partículas no llegaron a la ubicación del fotómetro solar, y, por ende, no existirá ninguna influencia de estas en el forzamiento radiativo terrestre.

**Figura 4.**  
**Estadística y representación gráfica de los porcentajes de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de marzo-2015.**



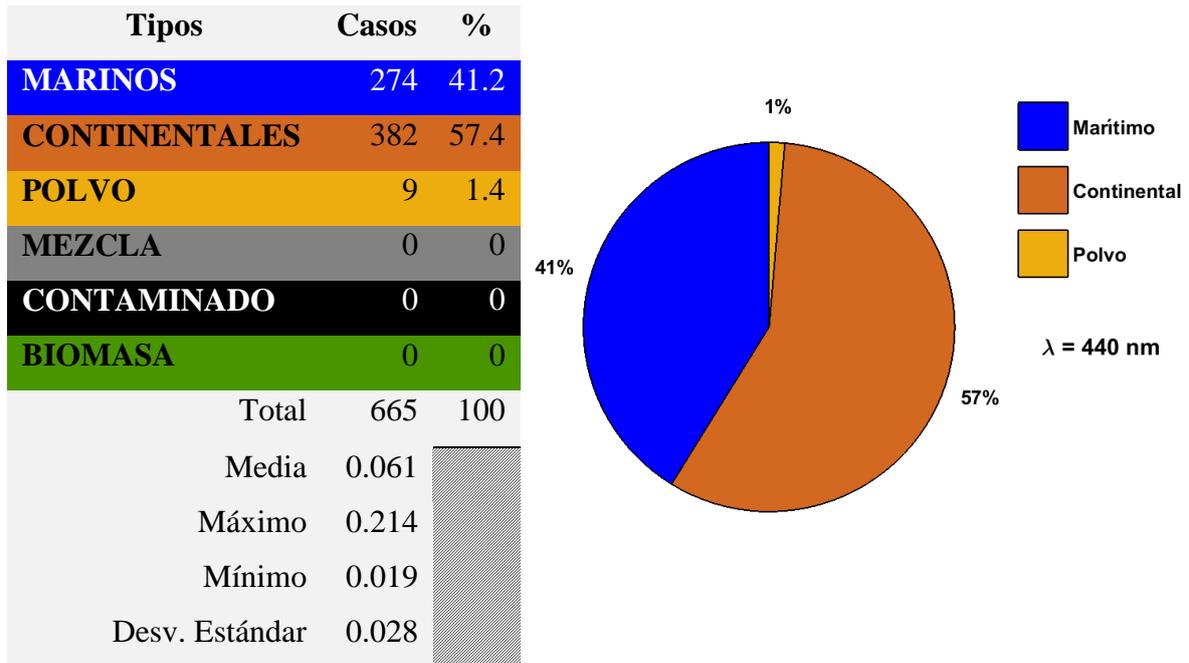
Fuente: Elaboración propia en base a los datos de AERONET, 2016.

#### 4.1.1.1.2. Abril

En el mes de abril (Figura 5), se registró una media 0,0614, valor bastante bajo que nos indica que en este mes tampoco hubo ningún caso de estudio. El valor máximo registrado es de 0,2142 que se debe a marinos y continentales, no se registró ningún caso correspondiente a contaminado o biomasa. Se registraron 11 casos no válidos. El tipo de aerosol que predominó fue continentales con 57,4%, seguido por los marinos con un 41,2% y, con mínima presencia, los de tipo polvo con tan

sólo un 1,4%. Ello puede deberse a los fuertes vientos en la costa del Perú u otros factores meteorológicos.

**Figura 5.**  
**Estadística y representación gráfica de los porcentajes de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de abril-2015.**



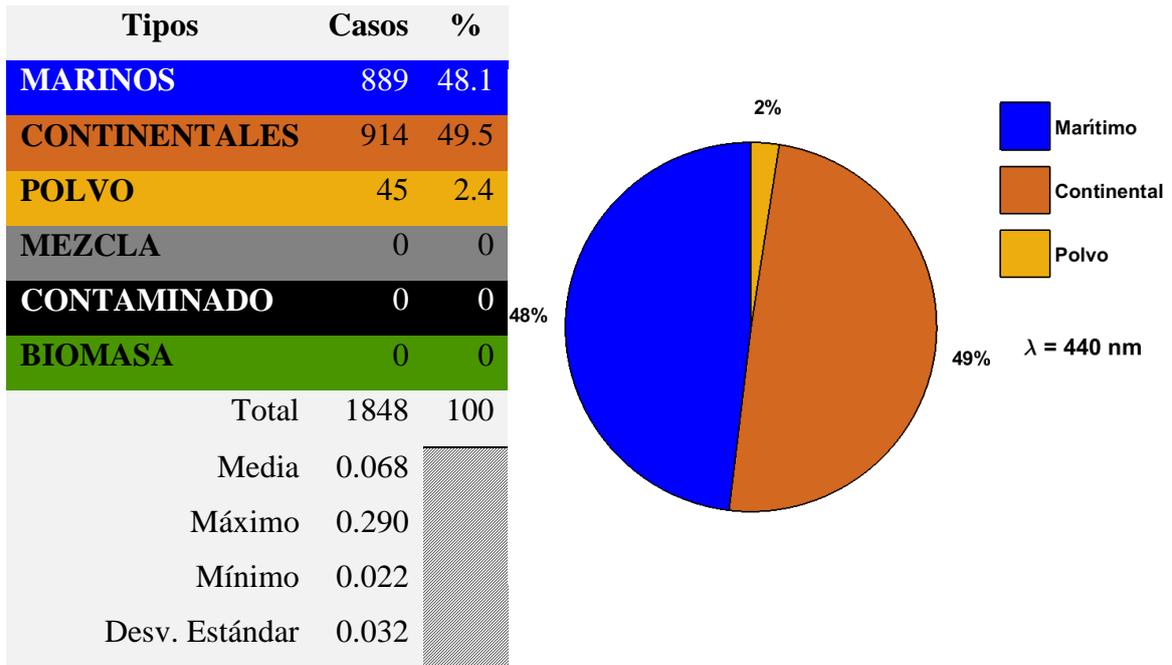
Fuente: Elaboración propia en base a los datos de AERONET, 2016.

#### 4.1.1.1.3. Mayo

La media obtenida para el mes de mayo fue de 0,0682, con un valor máximo de 0,2895 que corresponde al tipo marino, continental o mezcla. No se registraron casos coincidentes con las características señaladas para los tipos biomasa o contaminado ni mezcla. En este mes predominaron los tipos de aerosoles continentales con un 49,5% (Figura 6), casi con la misma presencia de los aerosoles de tipo marinos, los que registran un 48,1% del total de casos. Los aerosoles de tipo polvo con mínima presencia, representados por el 2,4% del total. Los valores obtenidos no dan señal de que exista alguna influencia de quemas de biomasa en los registros de EOA en la ciudad de Huancayo, más por el

contrario, al igual que en los meses anteriores puede deberse a otros factores meteorológicos.

**Figura 6.**  
**Estadística y representación gráfica de los porcentajes de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de mayo-2015.**

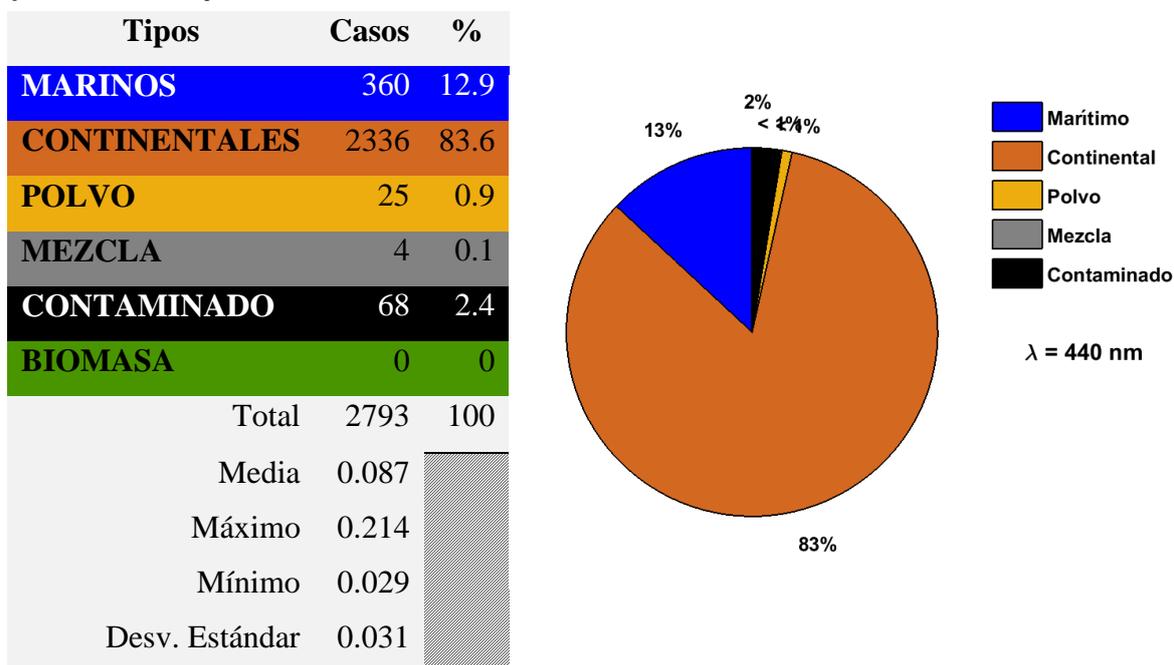


Fuente: Elaboración propia en base a los datos de AERONET, 2016.

#### 4.1.1.1.4. Junio

En este mes se obtuvo una media de 0,0873, que representa un valor bajo que no amerita un enfoque o análisis profundo, apoyándonos además en el valor máximo obtenido de 0,2139 (Figura 7).

**Figura 7.**  
**Estadística y representación gráfica de los porcentajes de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de junio-2015.**



**Fuente:** Elaboración propia en base a los datos de AERONET, 2016.

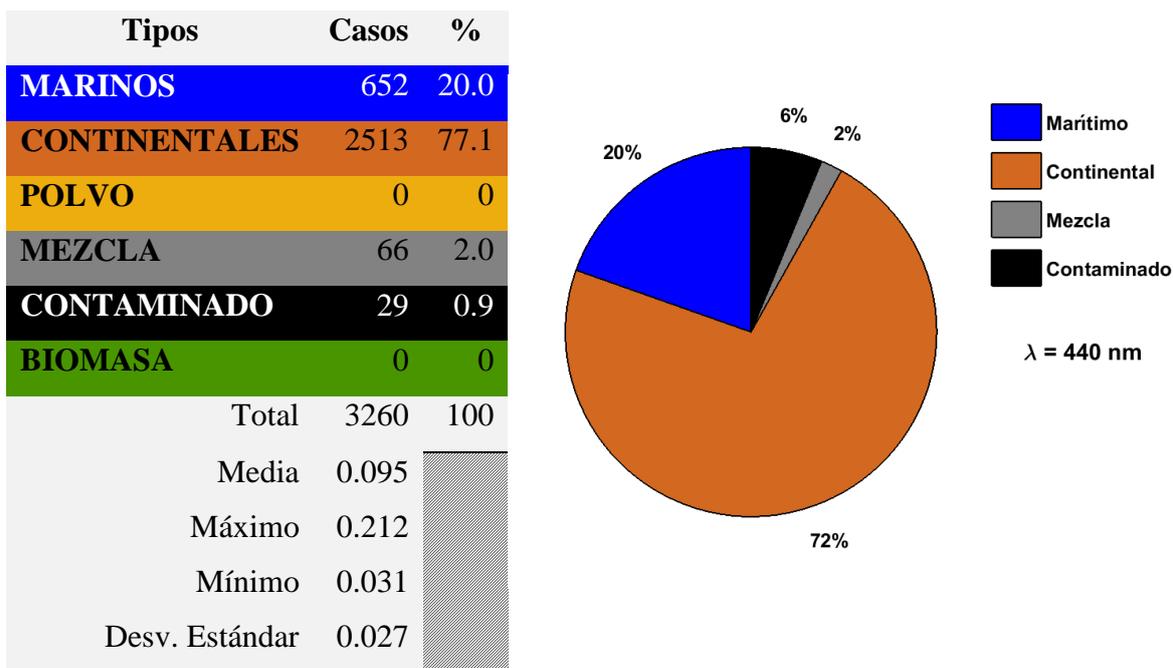
Este valor máximo pertenece al tipo contaminado, lo que podría deberse a algún caso de quema de biomasa, sin embargo, este valor es demasiado bajo para que pueda tener alguna influencia en el forzamiento, motivo por el cual no se considerará como caso de estudio. Predominaron los aerosoles de tipo continental con 83,6%, seguido por los marinos con un 12,9%, a continuación, los de tipo contaminado con 2,4%, con 0,9% los del tipo polvo y finalmente, con menor presencia, el tipo mezcla con el 0,1% del total.

#### 4.1.1.1.5. Julio

La media obtenida para julio fue de 0,0947. Si se analiza el comportamiento de los valores medios de EOA, se puede apreciar que, mes a mes, la media va teniendo una tendencia ascendente. En este mes el valor máximo es de 0,2117, bajo aún, sin requerimiento de un mayor análisis. Predominan de igual manera los aerosoles tipo continentales con un 77,1%. A este le siguen los de tipo marino con 20%, y con menor presencia los de tipo mezcla con 2% y con 0,9% el tipo contaminado.

Para el caso de los aerosoles del tipo biomasa, no se han registrado casos como puede apreciarse en la Figura 8.

**Figura 8.**  
**Estadística y representación gráfica de los porcentajes de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de julio-2015.**



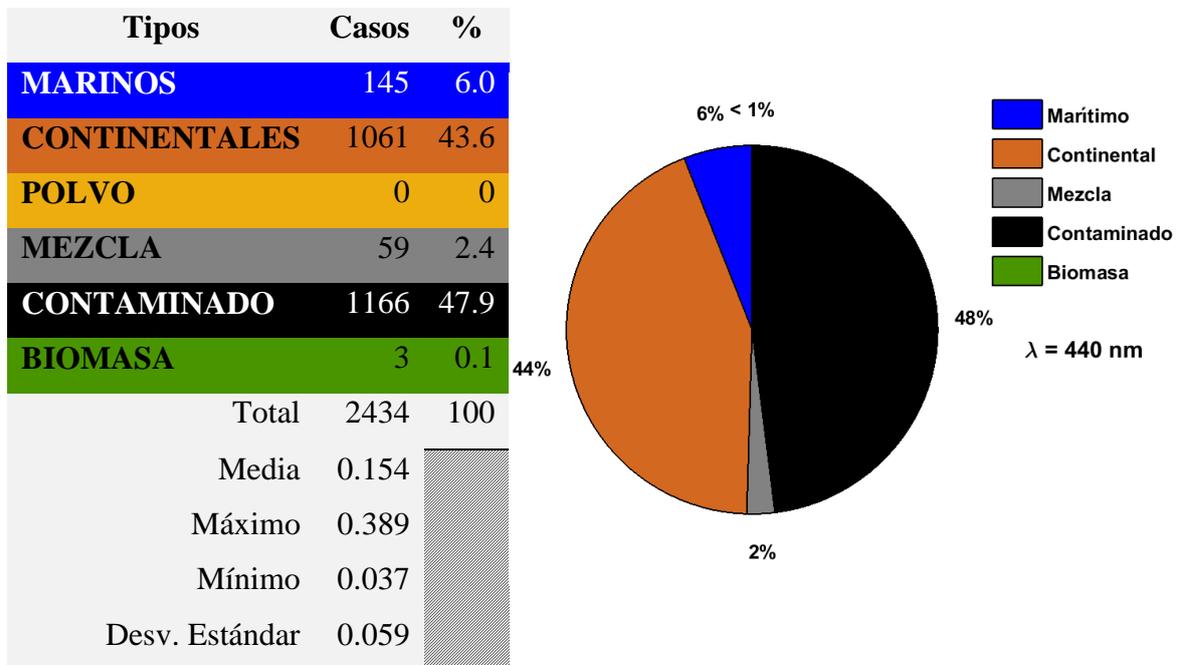
Fuente: Elaboración propia en base a los datos de AERONET, 2016.

#### 4.1.1.1.6. Agosto

Se conoce que la época de sequía es propicia para la quema de biomasa, sobre todo debido a factores naturales, pero también influenciados por el ser humano, motivo por el cual, la concentración de aerosoles de este tipo se incrementa. Se considera como época seca el período comprendido entre julio y noviembre, sin embargo, de acuerdo a estos datos, agosto es el mes en que dicho incremento es notorio. La media alcanza en este mes el valor de 0,1537, claramente superior a los meses anteriores (Figura 9). El valor máximo es de 0,3885, cabe mencionar que, en los resultados de los datos para los tipos de aerosoles contaminados y biomasa, existen muchos casos en el que los valores fluctúan cercanos al máximo. Así también, otro dato a destacar, es que en este mes el porcentaje de casos de tipo contaminado supera por primera vez al tipo

continental, alcanzando valores de 47,9% y 43,6%, respectivamente. Recordemos que en los meses anteriores los casos registrados de tipo continental eran los de mayor presencia. Con valores menores tenemos a los aerosoles marinos con 6%, aerosoles tipo mezcla con 2,4%, y por primera vez tenemos registrada la presencia de aerosoles tipo biomasa con el 0,1%. Este valor indica una presencia mínima, pero cabe recalcar lo mencionado al inicio de este capítulo respecto a que los aerosoles del tipo contaminado incluyen aerosoles que provienen de la quema de biomasa.

**Figura 9.**  
**Estadística y representación gráfica de los porcentajes de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de agosto-2015.**

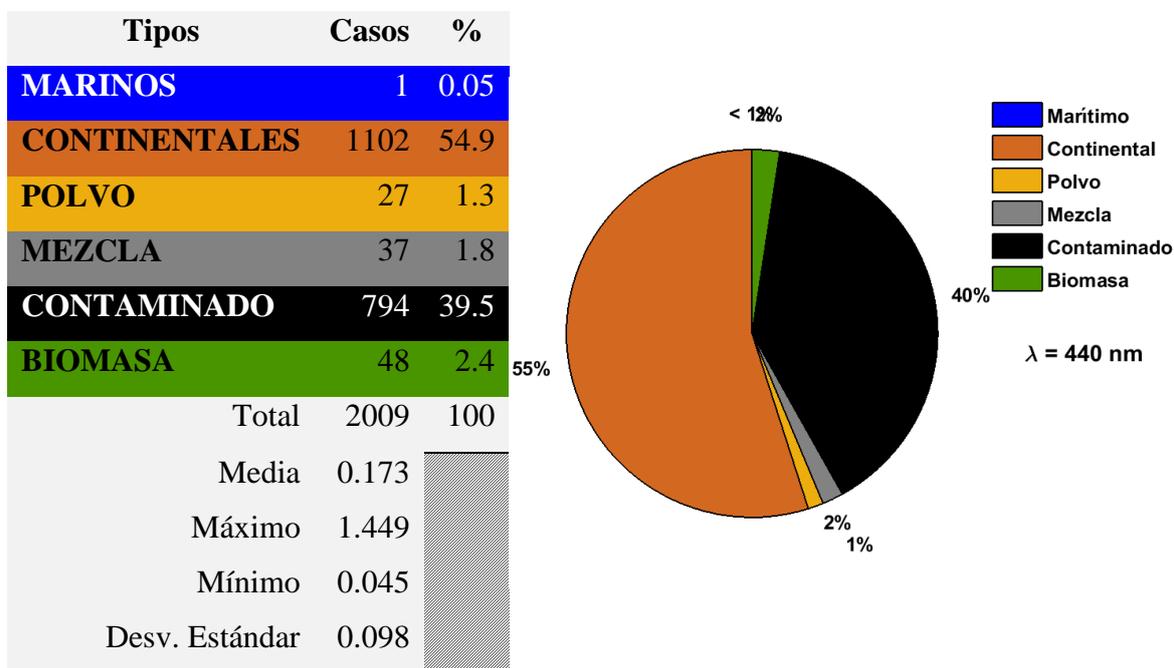


Fuente: Elaboración propia en base a los datos de AERONET, 2016.

#### 4.1.1.1.7. Septiembre

La media registrada para este mes, es la más alta de los meses analizados, alcanzando el valor de 0,1728, que se debe a los altos valores en EOA registrados de manera general (Figura 10).

**Figura 10.**  
**Estadística y representación gráfica de los porcentajes de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de septiembre-2015.**



**Fuente:** Elaboración propia en base a los datos de AERONET, 2016.

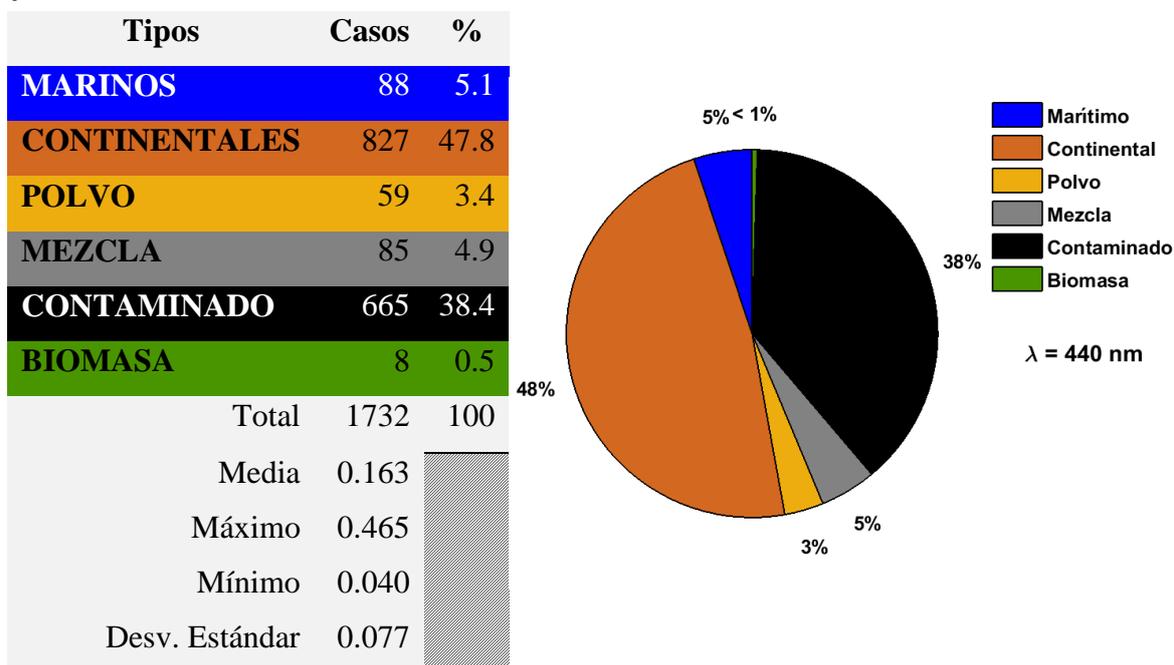
El valor máximo fue de 1,4438, aunque no pertenece al tipo biomasa, cabe mencionar que tanto en los aerosoles de tipo contaminado como en los de biomasa, se registraron valores altos que requieren un análisis posterior. Predominan los aerosoles de tipo contaminado con el 54,85% seguidos, sin mucha diferencia, por los de tipo contaminados con el 39,52%, a continuación, se encuentran los de tipo biomasa con 2,39%, siendo este el mes con el valor más alto en el año. La presencia de los de tipo mezcla es mínima con tan solo el 1,84%. El tipo polvo alcanza el valor de 1,34% y finalmente los marinos con 0,05% (el porcentaje baja de manera notoria en relación a los meses anteriores). Se tiene también 1 caso no válido de un total de 2010 casos analizados.

#### **4.1.1.1.8. Octubre**

En este mes la media disminuye en comparación con el mes de septiembre, con un valor de 0,1633 como puede ser apreciado en la Figura 11.

El valor máximo, de igual manera, disminuye y pasa de 1,4486 a 0,4645 (aunque haya disminuido, se considera aun alto este valor, requiere de mayor análisis y considerar los casos de estudio correspondientes). Vuelve a predominar la presencia de aerosoles del tipo continentales y de tipo contaminado, con una pequeña diferencia entre ambos, obteniendo así un porcentaje de 47,75% y 38,39%, respectivamente. La presencia de aerosoles marinos es de 5,08% respecto al total, seguido por los de tipo mezcla con el 4,91%, a continuación, se encuentran los aerosoles del tipo polvo con el 3,41% y finalmente, los de tipo biomasa con 0,46%. Este valor disminuye en relación a septiembre, pero aún hay presencia de este tipo, teniendo valores que pueden ser considerados como casos de estudio. Después del análisis de octubre se puede afirmar que septiembre fue el mes de mayor actividad de quema de biomasa, ello se corroborará con datos de MODIS y otros instrumentos, así como con el procesamiento y análisis de datos que serán mostrados más adelante, incluyendo información de los modelos atmosféricos empleados.

**Figura 11.**  
**Estadística y representación gráfica de los porcentajes de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de octubre-2015.**

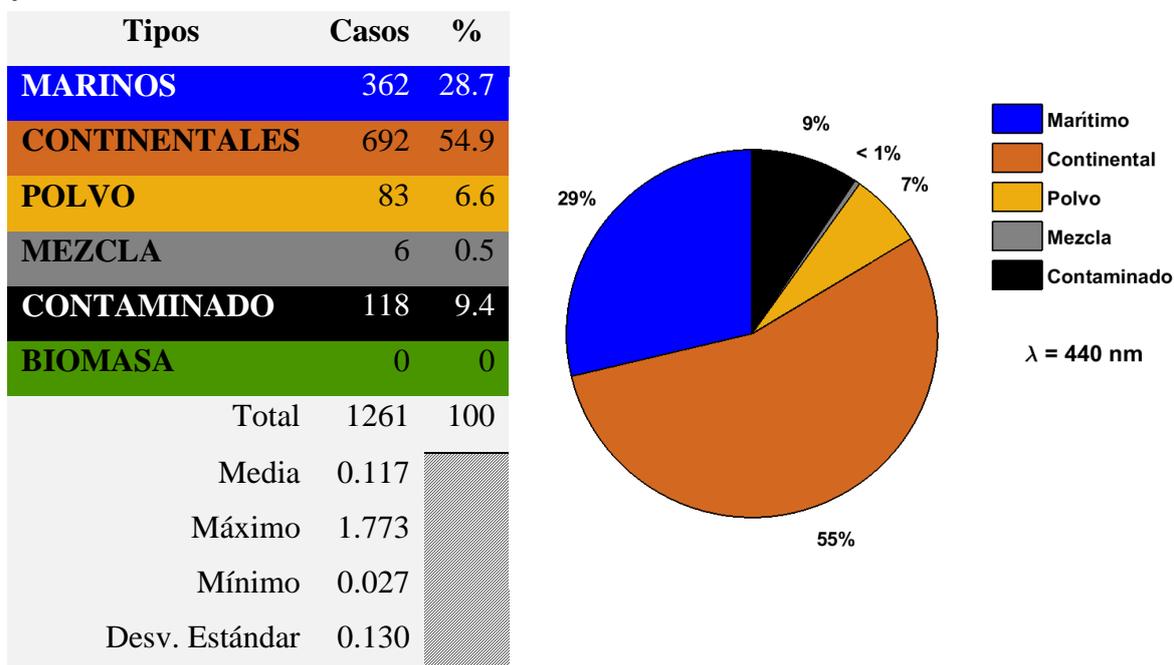


Fuente: Elaboración propia en base a los datos de AERONET, 2016.

#### 4.1.1.1.9. Noviembre

Para este mes (Figura 12), se obtuvo una media de 0,1166; este valor continúa con la tendencia descendente a partir del mes de septiembre. El valor máximo es de 2,43; que corresponde a contaminado. Los aerosoles continentales otra vez representan el mayor porcentaje respecto al total de casos con 54,88%, seguidos por aerosoles marinos con 28,71%. Estos valores aparentemente vuelven a tener la tendencia de los valores registrados entre marzo – julio. Con menor presencia se registraron los de tipo contaminado con 9,36%, polvo con 6,58% y finalmente mezcla con 0,48%. Para este mes ya no se registra la presencia de aerosoles de tipo biomasa. En este mes hubo 15 casos no válidos, o sea, aquellos donde el Coeficiente de Angstrom es menor que cero.

**Figura 12.**  
**Estadística y representación gráfica de los porcentajes de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de noviembre-2015.**

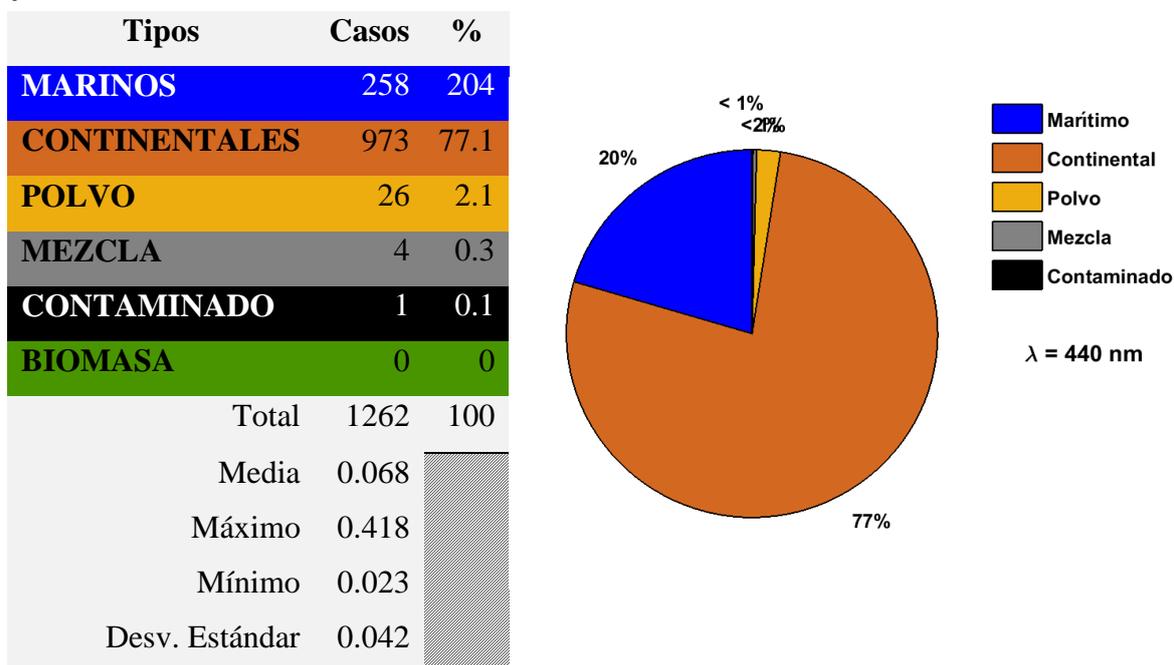


Fuente: Elaboración propia en base a los datos de AERONET, 2016.

#### 4.1.1.1.10. Diciembre:

En diciembre la media toma el valor de 0,68, y el valor máximo es de 0,4184. Estos valores, sobre todo la media, disminuyen teniendo un comportamiento, entonces durante el año, en forma de campana, con el máximo en el mes de septiembre. La presencia de aerosoles continentales abarca mucho más de la mitad con el 77,10% del total de casos registrados como puede apreciarse en la Figura 13.

**Figura 13.**  
**Estadística y representación gráfica de los porcentajes de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de diciembre-2015.**



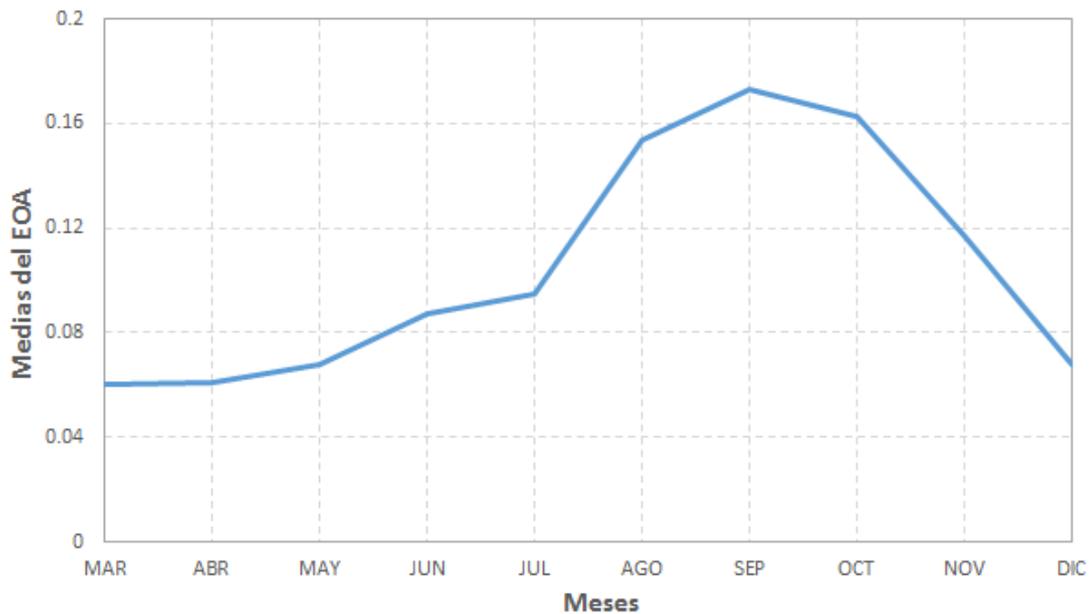
**Fuente:** Elaboración propia en base a los datos de AERONET, 2016.

Los aerosoles marinos tienen el 20,44%, los de tipo polvo el 2,06% y con una presencia casi nula los aerosoles de tipo contaminados con el 0,08%. Se observa una presencia nula respecto a los aerosoles de tipo biomasa. Coincidiendo con el mes anterior, en este mes se registran 15 casos no válidos.

A modo de resumen se puede plantear que la presencia de aerosoles por la quema de biomasa tiene lugar entre los meses de agosto y octubre, con el valor máximo de la media del EOA en el mes de septiembre (Figura 14). De esta forma, luego del análisis de las figuras anteriores se aprecia una tendencia ascendente; primero ésta es ligera a partir del mes de marzo y hasta el mes de julio, donde hay un incremento brusco hasta alcanzar el máximo en el mes de septiembre como ya fue mencionado. Luego desciende ligeramente en el mes de octubre y más bruscamente en los meses de noviembre y diciembre. Estos resultados coinciden con la tendencia ascendente del número de focos de incendios a partir del mes de junio con el máximo de estos, también, en el mes de septiembre. De la Figura 14 puede inferirse que, aun cuando no se tiene información

de los meses de enero y febrero, todo parece indicar que, entre los meses de diciembre y mayo, las condiciones no son favorables para la ocurrencia de incendios, coincidiendo con el período de las lluvias y que los valores registrados durante este período pueden ser considerados con los valores medios de fondo del EOA.

**Figura 14.**  
**Comportamiento mensual de las medias del EOA.**



A partir del análisis por meses realizado anteriormente y del análisis de coincidencia espacio-temporal entre las mediciones en superficie de EOA, del fotómetro solar y la información satelital derivada de MODIS, se realizará la selección de algunos casos de estudios. Primero es necesario seleccionar los días para los cuales se realizará la descarga de datos de MODIS, esto se hará teniendo en cuenta los días con los mayores valores de EOA debido a la presencia de aerosoles del tipo biomasa y contaminado. A partir de este criterio se seleccionaron los casos que aparecen en el siguiente epígrafe.

#### **4.1.1.2. Clasificación de los datos de MODIS**

A partir del criterio de selección antes mencionado, para el cual se ha empleado la información de EOA descargada de AERONET, se han seleccionado fechas que resultan inicialmente de interés y se procedió a la descarga de los datos de EOA y Coeficiente de Angstrom derivados de las mediciones de MODIS. A partir de todo esto se seleccionaron las siguientes fechas para la descarga de datos de MODIS:

- Agosto: 26 – 31
- Septiembre:
  - 01 – 02
  - 10 – 19
  - 24 – 26
- Octubre:
  - 12 – 15

De forma experimental, se han empleado los mismos criterios de clasificación de los diferentes tipos de aerosoles, empleados para los datos de AERONET, para ser aplicado a los datos de MODIS. Esto se hace con el objetivo de determinar la distribución de los diversos tipos de aerosoles.

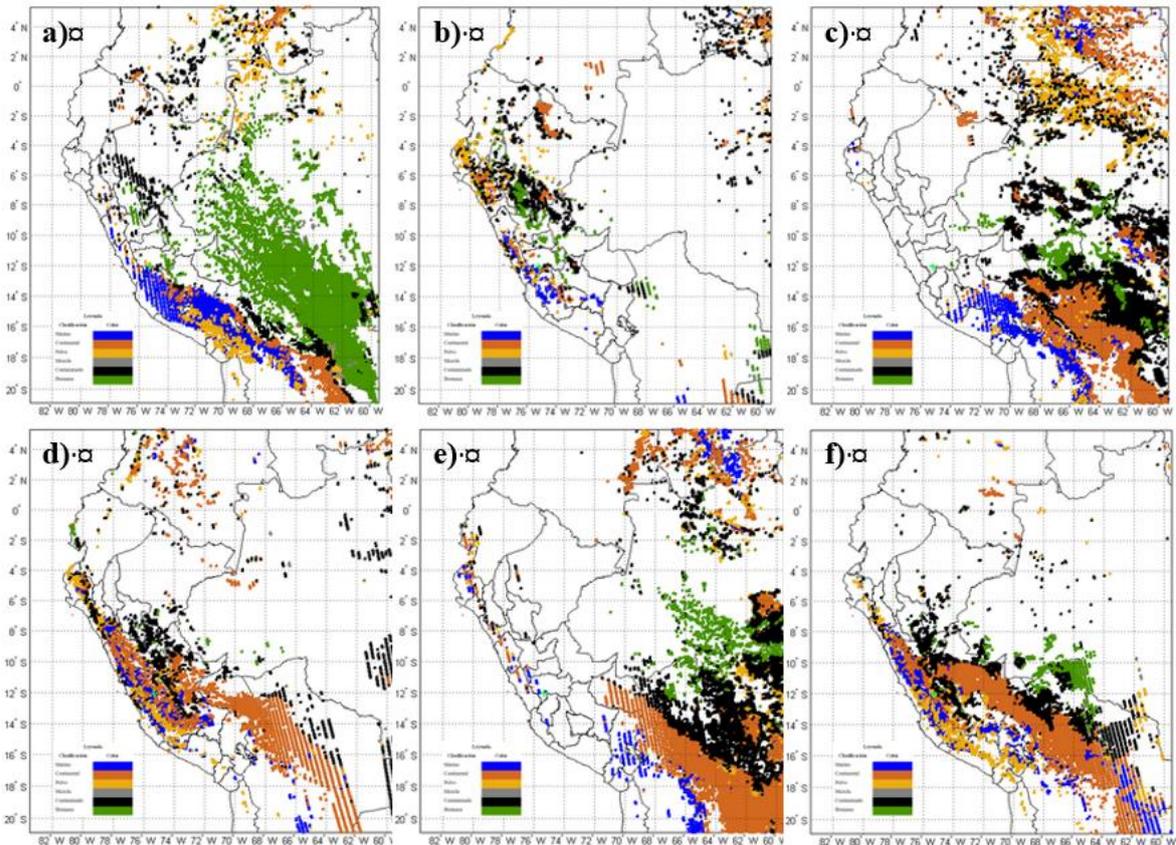
#### **4.1.1.3. Datos MODIS (agosto 26 – 31)**

En la Figura 15 se representa el comportamiento entre los días 26 al 31 de agosto de 2015. Cada color representa los mismos tipos de aerosoles tal y como se explicó para el caso de los datos de AERONET.

El día 26 de agosto se observa una gran concentración de aerosoles originados por la quema de biomasa concentrados en la región norte de Bolivia y en el oeste de Brasil. Para el día 25, las cantidades son menores, sin embargo, se puede apreciar la presencia de aerosoles por la quema de biomasa en la zona centro del Perú, que involucra Junín. El día 28, nuevamente se observa la presencia de aerosoles en lo que corresponde al área territorial de Bolivia y Brasil que al día siguiente llegan a los Andes.

Este mismo fenómeno vuelve a ocurrir el día 30 con la misma tendencia ubicándose sobre los Andes del Perú.

**Figura 15.**  
Tipos de aerosoles según datos de MODIS para el mes de agosto de 2015 para los días: 26 a); 27 b); 28 c); 29 d); 30 e) y 31 f).

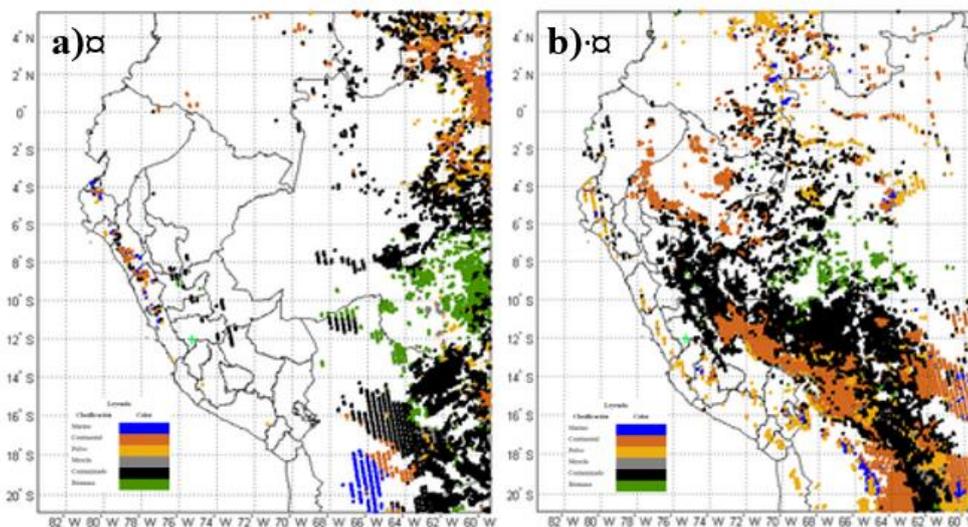


Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos de MODIS, 2016.

#### 4.1.1.4. Datos MODIS (septiembre 01 – 02)

En el análisis realizado anteriormente para los datos registrados por el fotómetro solar, se pudo observar que septiembre es el mes en el que se registró mayor actividad de incendios forestales, lo que influyó en el incremento de EOA para estas fechas. Se extrajeron datos de MODIS del 01 y 02 de septiembre, luego del procesamiento realizado se muestran los resultados obtenidos para los días 1 y 2 (Figura 16).

**Figura 16.**  
**Tipos de aerosoles según datos de MODIS para el mes de septiembre de 2015 para los días:**  
**1 a); 2 b).**



**Fuente:** Elaboración propia a partir de la base de datos de MODIS, 2016.

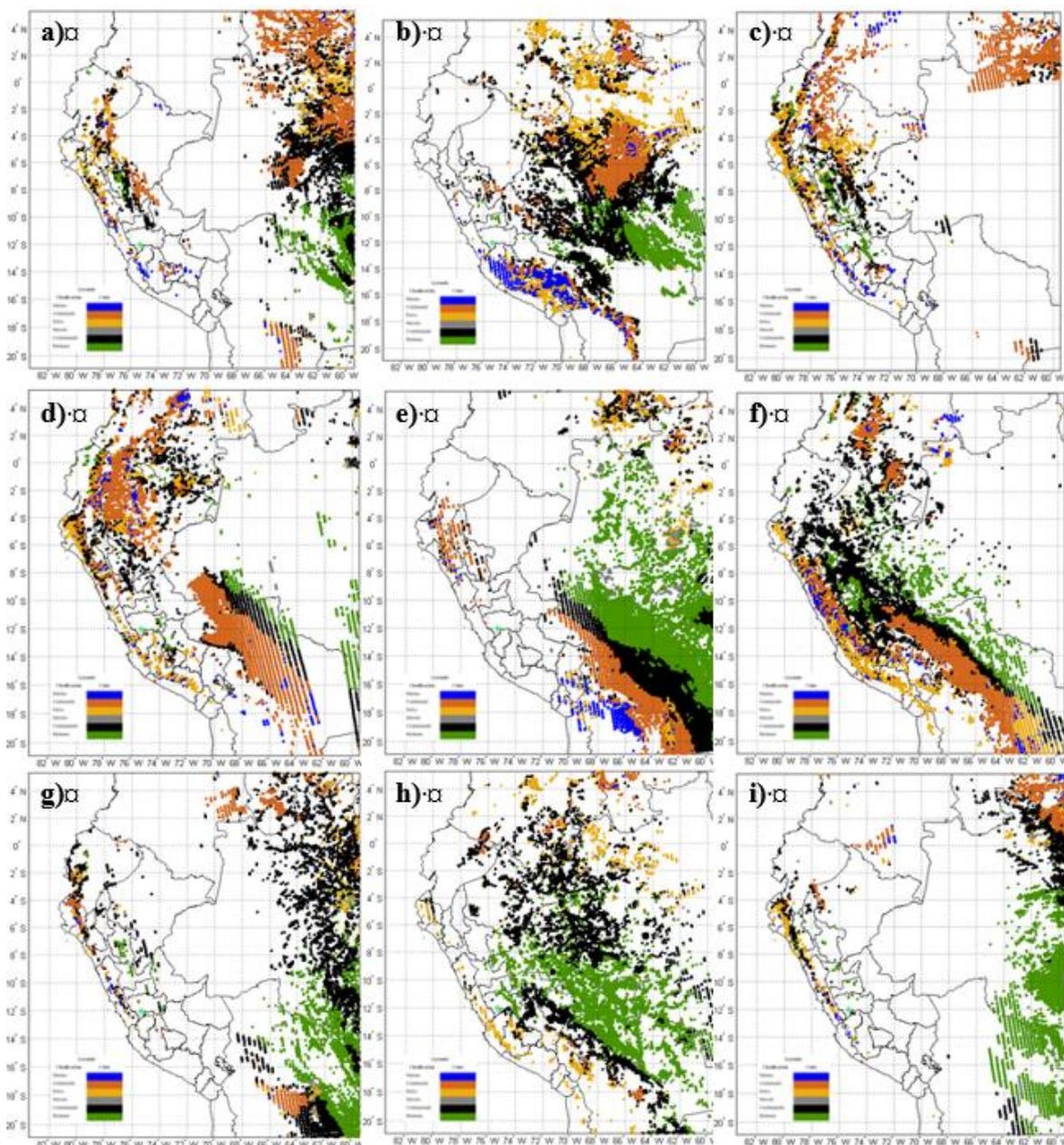
El día 2 hubo una mayor presencia de aerosoles que cubren las zonas centro (sierra) y selva baja del Perú, además áreas territoriales tanto de Brasil como de Bolivia. Esto corrobora lo que en un anterior estudio (mencionados en los antecedentes del presente trabajo), manifiestan respecto a que gran porcentaje de aerosoles que llegan a los Andes peruanos provienen de países vecinos (Brasil y Bolivia).

#### **4.1.1.5. Datos MODIS (septiembre 10 – 19)**

El siguiente intervalo seleccionado para la descarga de datos de MODIS fue entre los días 10 y 19 de septiembre. En la Figura 17 se representan los resultados de MODIS, los que revelan la presencia de aerosoles y su concentración areal.

Figura 17.

Tipos de aerosoles según datos de MODIS para el mes de septiembre de 2015 para los días: 10 a); 11 b); 12 c); 14 d); 15 e); 16 f); 17 g); 18 h) y 19 i).



Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos de MODIS, 2016.

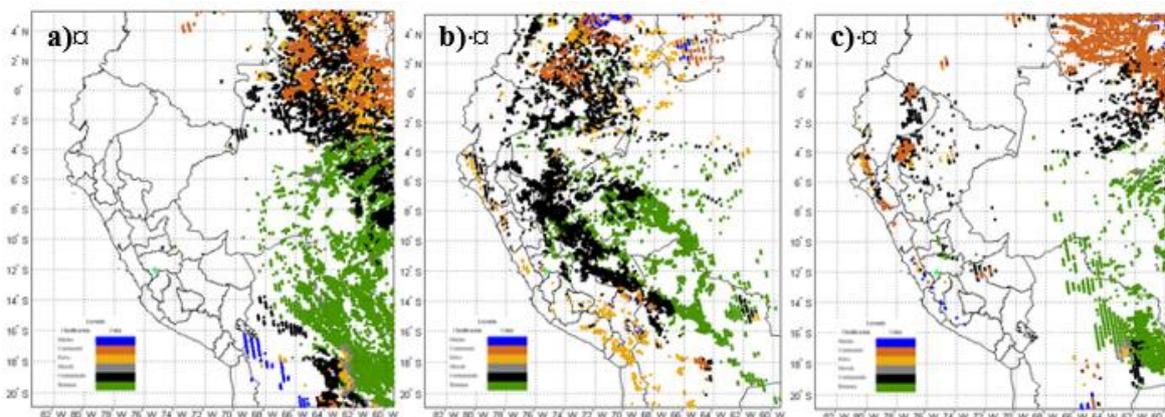
Debido a que no existen datos para el día 13 de septiembre, este día no fue incluido en la figura. El día 10 no se evidencia mayor presencia de aerosoles sobre los andes peruanos, sin embargo, el día 11 la concentración se incrementa, predominando los aerosoles de tipo contaminación, biomasa y continentales. No obstante, sobre la región del Amazonas, en Brasil, se aprecian importantes concentraciones de

aerosoles relacionados con la quema de biomasa. El registro de datos se normalizó para el día 14, luego de que como se mencionó anteriormente, el día 13 no existen registros de MODIS. Sobre el Perú no se evidencia ninguna actividad que merezca un mayor análisis, sobre todo porque sobre el espacio geográfico correspondiente a Junín, no hay concentraciones considerables. Podría inferirse que entre Brasil y Bolivia hay una gran actividad de incendios forestales, pues así lo demuestra la imagen correspondiente al día 15, ya que existen grandes concentraciones de aerosoles en esta zona vinculados a la quema de biomasa, sin embargo, sobre la región de estudio no se aprecian concentraciones significativas. El día 16 se ve una amplia concentración de aerosoles continentales entre Bolivia, Brasil y el sureste de Perú; concentración de aerosoles por la quema de biomasa en Brasil y en los Andes de Perú con una mezcla de aerosoles tipo contaminado alrededor de esta zona. El 17 de este mes no se registran concentraciones significativas o que requieran un mayor estudio, pero el 18 se aprecia que los aerosoles que predominan son precisamente los de tipo biomasa y contaminado a lo largo de toda la Amazonía. Finalmente, el día 19 se puede observar condiciones de una atmósfera más limpia, al menos, de la presencia de aerosoles.

#### **4.1.1.6. Datos MODIS (septiembre 24 – 26)**

El último intervalo de fechas que se consideró para el mes de septiembre fueron los días 24, 25 y 26, los que se muestran en la Figura 18. Después de su respectivo procesamiento en Matlab obtuvimos los gráficos que se muestran a continuación. En el gráfico (18 - a) correspondiente al día 24 de este mes, se evidencian concentraciones de aerosoles tipo biomasa sobre el área perteneciente al norte de Bolivia y alguna presencia en la amazonia brasileña, estos parecen haber llegado a Perú, pero en mínimas concentraciones al día siguiente.

**Figura 18.**  
**Tipos de aerosoles según datos de MODIS para el mes de septiembre de 2015 para los días:**  
**24 a); 25 b); 26 c).**



**Fuente:** Elaboración propia a partir de la base de datos de MODIS, 2016.

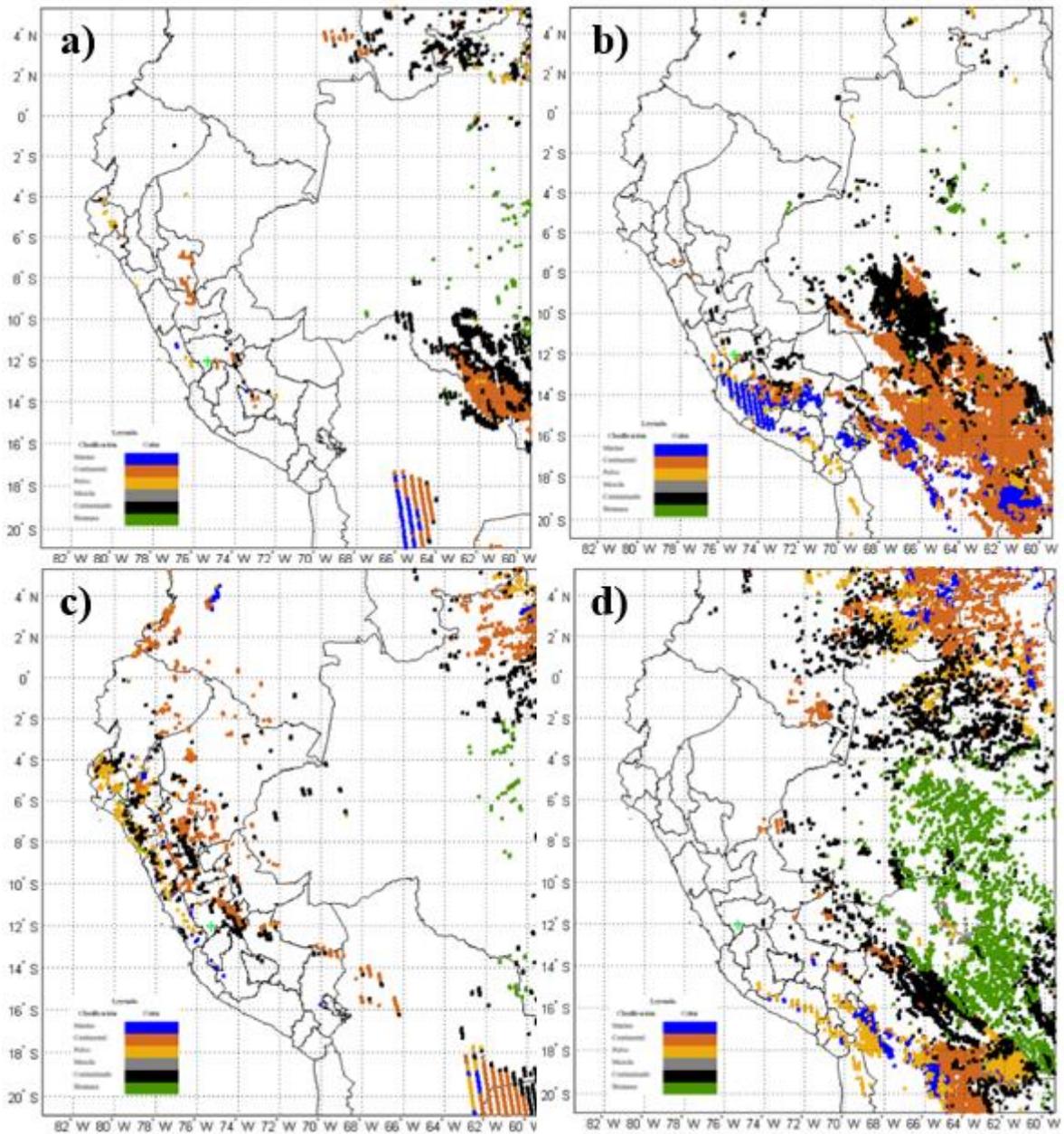
Lo que se puede destacar para el 25 es un incremento en las concentraciones de aerosoles tipo contaminado sobre los Andes peruanos con algunas concentraciones en menor cantidad de aerosoles tipo biomasa. Para el 26 las concentraciones disminuyen y no hay mayores concentraciones sobre el territorio peruano.

#### **4.1.1.7. Datos MODIS (octubre 12 – 15)**

En octubre, de acuerdo a los datos extraídos con el fotómetro solar CIMEL CE-318T perteneciente a la red de AERONET, los días 12, 13, 14 y 15 se registraron valores elevados del EOA, motivo por el cual fue el último intervalo seleccionado para la extracción y análisis de los datos del espectro radiómetro MODIS (Figura 19). El día 12 aparentemente se tiene un cielo despejado sin mayores concentraciones de aerosoles de ningún tipo. Este panorama no sufre mayor alteración al día siguiente (19 - b) lo que sí se puede notar es una concentración de aerosoles tipo continentales y contaminado al norte de Bolivia y suroeste de Brasil, y en menor medida, concentraciones de aerosoles de tipo marinos, en la costa (sur) del Perú, ello no tiene mayores repercusiones para los objetivos del presente estudio. Durante el día 14 se aprecia una presencia mínima de aerosoles continentales y de tipo contaminado, pero aparentemente no denota ninguna posible influencia en Junín. El día 15 hay

concentraciones de aerosoles de biomasa considerables en Brasil y Bolivia, sin embargo, se aprecia el territorio peruano despejado.

**Figura 19.**  
**Tipos de aerosoles según datos de MODIS para el mes de octubre de 2015 para los días: 12 a); 13 b); 14 c) y 15 d).**

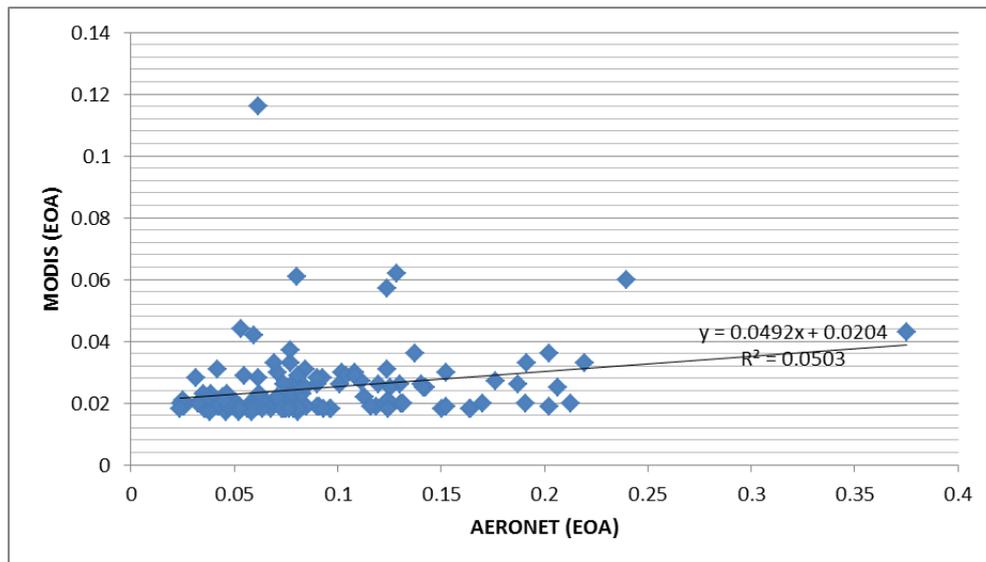


Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos de MODIS, 2016.

#### 4.1.2. COMPARACIÓN DE LOS DATOS DE AERONET - MODIS:

A partir de los datos de EOA obtenidos de AERONET y MODIS de marzo a diciembre, se realizó una correlación, obteniendo lo siguiente:

Figura 20: Correlación de los datos de AERONET y MODIS.



Fuente: Elaboración propia en base a los datos de AERONET y MODIS 2016.

En la Figura 20 el valor de  $R=0,05$  no refleja un valor significativo de correlación de datos entre el EOA obtenido por AERONET y MODIS.

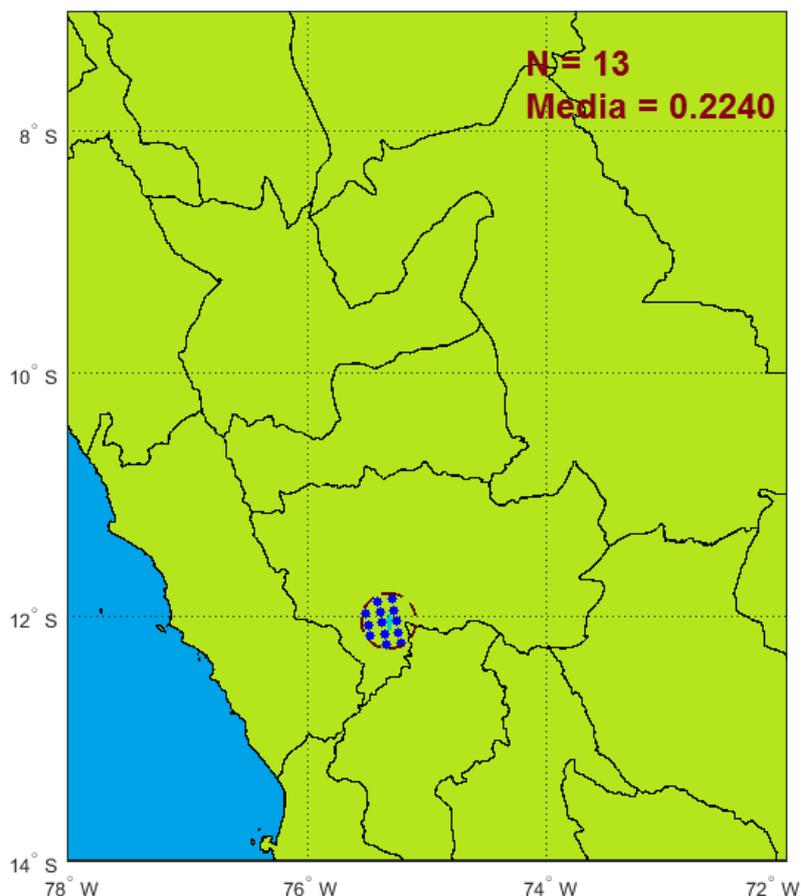
Por ello, en base a criterios espacio-temporales mencionados en el capítulo anterior y de las fechas de MODIS seleccionadas en el epígrafe anterior, se determinaron las mediciones coincidentes de MODIS y AERONET. Se calcularon los valores medios de EOA entre las mediciones coincidentes que cayeron dentro del rango de 50 km de diámetro en torno al punto donde se encuentra ubicado el fotómetro solar. Con el objetivo de escoger los días de mejor coincidencia se calcularon las diferencias entre los valores de EOA de MODIS y AERONET, así como se determinaron los coeficientes de correlación entre las series de días para, finalmente, escoger el mejor rango de fechas.

En la Figura 21 se representan, a modo de ejemplo, las mediciones coincidentes de MODIS en un radio de 50 km respecto a la ubicación del fotómetro solar localizado en el Observatorio de Huancayo, en este caso para el día 19 de septiembre de 2015. Se aprecia que el número de casos, o sea, las mediciones de MODIS que

caen dentro del radio de los 50 km es 13 ( $N = 13$ ). El valor medio del EOA para todos estos casos es de 0,2240. El borde del área de coincidencia está representado en la figura con un círculo de líneas discontinuas de color marrón y dentro de él las mediciones coincidentes (puntos de color azul). La ubicación del fotómetro solar está representada con una cruz de color verde.

**Figura 21.**

**Mediciones coincidentes de MODIS, basadas en el criterio espacio-temporal definido con el fotómetro solar para el día 17 de septiembre de 2015.**



**Fuente: Elaboración propia 2016.**

A partir de las fechas seleccionadas en el epígrafe anterior, las cuales se muestran en la Tabla 6, se seleccionaron las fechas con menores diferencias de EOA entre MODIS y AERONET, representadas en la tabla con las celdas de color verde y color azul. Las de color verde representan las diferencias menores, como promedio entre ellas que, sin tener en cuenta el signo, el valor medio es de 0,0155, mientras que las azules, continúan siendo bajas, pero superan con creces el promedio antes mencionado.

**Tabla 6.****Selección de fechas para los casos estudios, correspondientes a MODIS y AERONET.**

FECHA	HORA	MEDIA MODIS	MAX. MODIS	MEDIA AERONET	MAX. AERONET	DIF. DE MEDIAS
26/08/2015	18:09 - 19:53	0.141	0.228	0.134	0.158	0.006
27/08/2015	17:14 - 19:00	0.103	0.187	0.218	0.279	-0.114
29/08/2015	17:02 - 18:47	0.053	0.163	0.132	0.185	-0.078
30/08/2015	17:45 - 19:30	0.045	0.092	0.113	0.181	-0.068
31/08/2015	16:56 - 18:35	0.159	0.353	0.272	0.329	-0.113
12/09/2015	17:14 - 19:00	0.067	0.067	0.242	0.328	-0.175
14/09/2015	17:02 - 18:47	0.139	0.139	0.142	0.155	-0.003
16/09/2015	18:27 - 18:35	0.105	0.199	0.103	0.109	0.002
17/09/2015	17:32 - 19:18	0.201	0.201	0.166	0.221	0.035
19/09/2015	17:20 - 19:06	0.224	0.224	0.219	0.246	0.005
25/09/2015	18:21 - 18:29	0.161	0.176	0.124	0.139	0.037
12/10/2015	17:27 - 19:11	0.142	0.142	0.161	0.185	-0.019
13/10/2015	18:09 - 19:51	0.150	0.171	0.268	0.290	-0.119
14/10/2015	17:14 - 18:59	0.163	0.163	0.208	0.237	-0.045

El valor de la correlación entre ambas series de datos, para todas las fechas seleccionadas es de apenas 0,29, sin embargo, para las fechas de la tabla, comprendidas entre el 14 y el 25 de septiembre, la correlación alcanza el valor de 0,91 ( $R = 0,91$ ). Es basado en este criterio que se han seleccionado las fechas que serán consideradas como casos de estudios (celdas resaltadas en amarillo), que serán sometidos a un análisis más profundo que comprende, el análisis de retro trayectorias, así como la determinación del Forzamiento Radiativo por Aerosoles.

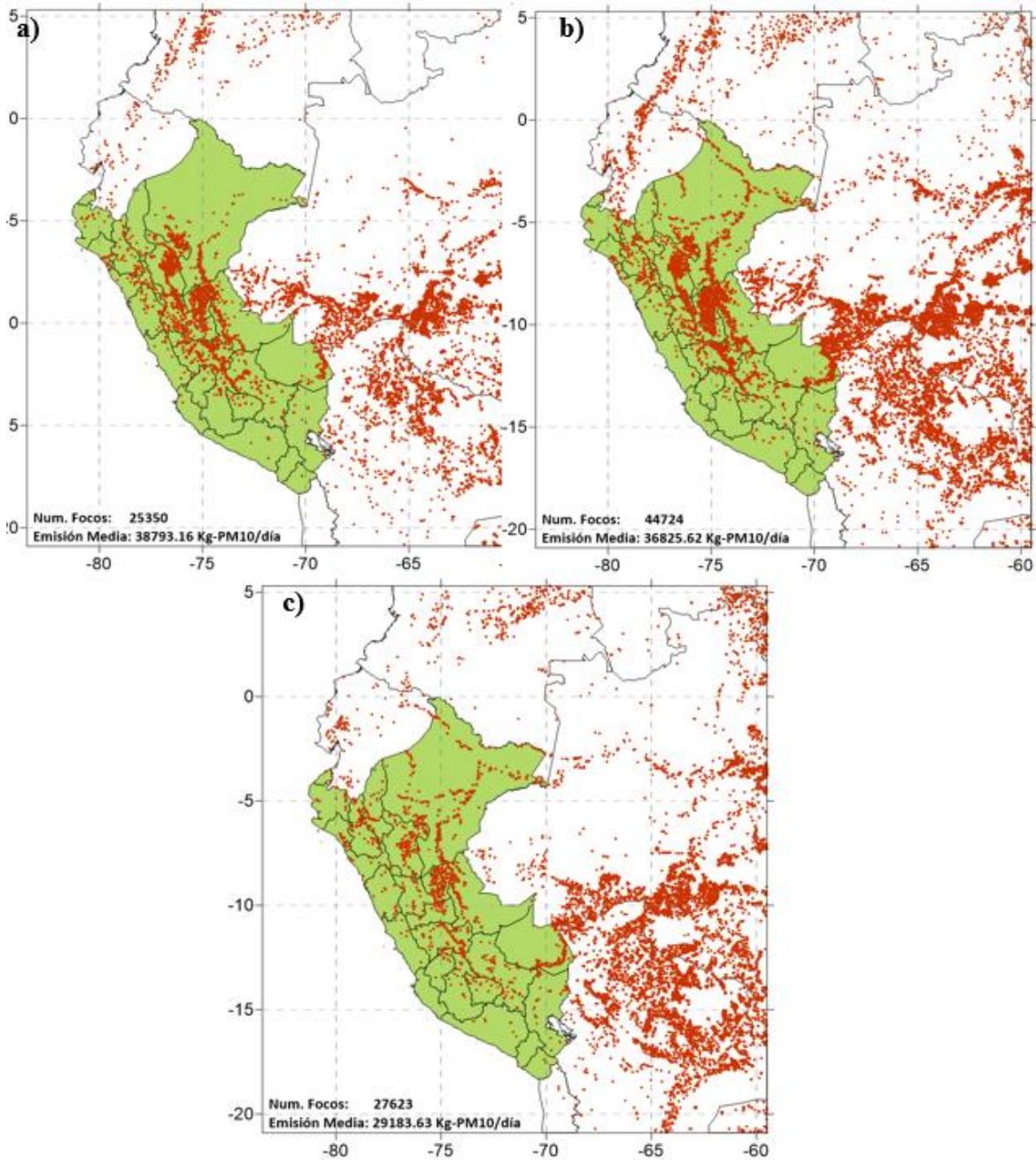
#### 4.1.2.1. Focos de incendios y transporte de aerosoles

A partir de los datos de focos de incendios y emisiones, descargados desde la plataforma ACRESP, se han ubicado geográficamente en el mapa del Perú (Figura 22) los focos de incendios correspondientes al periodo de agosto a octubre. Como se planteó en epígrafes anteriores, es en este período donde tuvo lugar las mayores concentraciones de EOA. Los puntos rojos sobre los mapas representan los focos de incendios. Se puede apreciar que el número de focos para toda la región analizada tiene su máximo en el mes de septiembre con un total de 44724 puntos de fuego, seguido del mes de octubre con 27623 y, finalmente, agosto con 25350 focos. Esto coincide con los análisis realizados previamente, donde el mes de septiembre fue el mes donde los valores de EOA medios alcanzaron su máximo. Sin embargo, en aparente

contradicción, las emisiones promedio por meses tienen su máximo, para toda región analizada, en el mes de agosto con un valor de 39793,16 Kg-PM10/día.

**Figura 22.**

**Total de focos de incendios para los meses de agosto a); septiembre b); y octubre c), período correspondiente a la quema de biomasa. Se muestra el número de focos por meses, así como, las emisiones promedio de material particulado (PM10), en Kg/día.**



Fuente: Elaboración por el Dr. René Estevan en base a los datos de ACRESP, 2016.

Con el objetivo de buscar una explicación a la aparente contradicción de que sea en el mes de agosto donde mayor volumen de emisiones se registró y que, sin embargo, es en el mes de septiembre donde se alcanzan los mayores valores de EOA, se analizó el caso particular de Perú. Para ello se muestran en la Tabla 7, los resultados del análisis de Perú, respecto a la región de estudio, para las emisiones promedio. Como puede apreciarse, en el mes de septiembre Perú aporta el 92,51 % de las emisiones promedios para este mes, mientras que en el caso de agosto estas representan solamente el 64,22 %. De esta forma quedan evidenciadas las razones que permiten explicar por qué se registraron, en el fotómetro solar instalado en el Observatorio de Huancayo, los mayores valores de EOA en el mes de septiembre. En el caso del número de focos, el mayor por ciento de estos para Perú, tiene lugar en el mes de agosto con el 41,39 %, descendiendo hasta octubre cuando alcanza el valor de 19,8 %. En septiembre el valor fue del 38,78 %.

**Tabla 7.**  
**Comparación entre Perú y la región de estudio, respecto a las emisiones promedios.**

Meses	Área	Perú	%
Agosto	38793,16	24912,87	64,22
Septiembre	36825,62	34067,62	92,51
Octubre	29183,63	22794,90	78,11

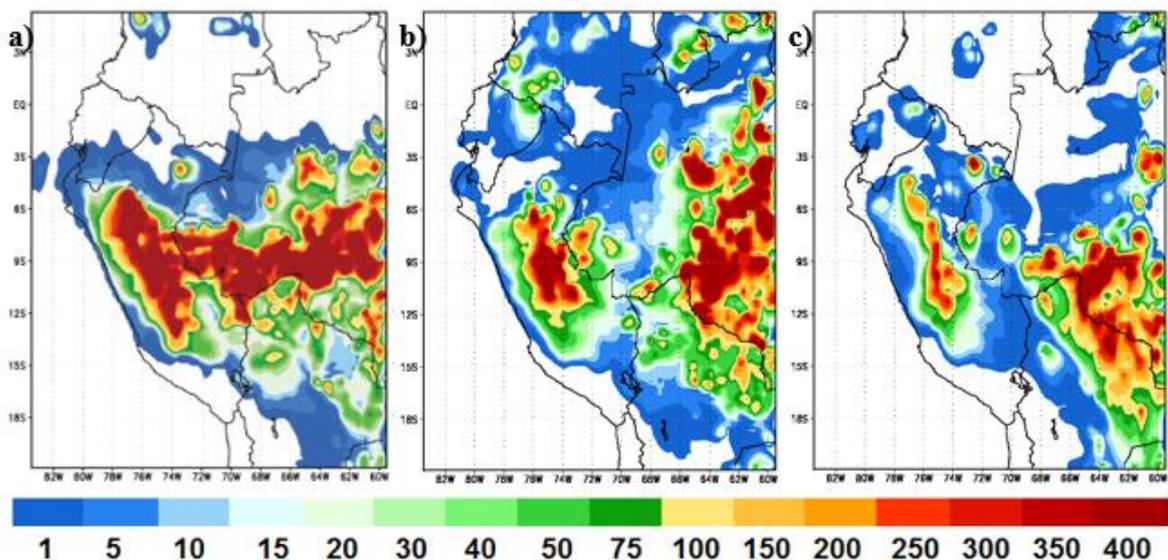
**Fuente: Elaboración propia 2016.**

La información de los focos de incendios y sus respectivas emisiones, para cada día, sirvieron como datos de entrada para las corridas diarias del modelo WRF-CHEM. A partir de las salidas de las simulaciones diarias, se calcularon las medias de las concentraciones de PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), para los meses de agosto a octubre (Figura 23). En esta figura se observan mayores concentraciones de PM10 en el mes de agosto, tanto sobre el Perú como en la región brasileña del Amazonas a lo largo del paralelo de los 9° S. En el caso de Perú las concentraciones se aprecian básicamente a lo largo de la sierra y abarcando parte de la Amazonía peruana, llegando a “conectar” con las concentraciones que se

encuentran sobre Brasil en torno a la latitud de los 9°. Aunque en las concentraciones que se encuentran sobre Perú, para este mes de agosto, existe un aporte de las partículas transportadas desde el este de Brasil y el norte de Bolivia, el mayor aporte sobre el país corresponde a los incendios generados en el propio Perú, superando el 80 % en varias regiones del país. El aporte de Brasil a los niveles de concentraciones de material particulado se registra fundamentalmente en localidades fronterizas del Perú con este país, como es el caso de Pucallpa y Puerto Maldonado. El aporte de los incendios ocurridos en el norte de Bolivia, a las concentraciones de PM10 en el Perú, son prácticamente insignificantes, contribuyendo apenas con el 0,5 % en la región de Puerto Maldonado.

En los meses de septiembre y octubre (Figura 23; b y c, respectivamente), se aprecia con claridad la “desconexión” existente entre las concentraciones que se encuentran sobre Brasil y Perú. En el mes de septiembre, las concentraciones sobre el Perú son todavía importantes, pero básicamente ha habido una contracción y se focaliza fundamentalmente en la región de la selva central del Perú, así como, en la zona amazónica correspondiente a esta región. Las mayores concentraciones sobre el este de Brasil dejan de ser latitudinales para pasar a ser básicamente longitudinales. Se aprecia un incremento, no muy significativo, en las concentraciones sobre el norte de Bolivia. En el mes de octubre por su parte, las concentraciones de PM10 sobre Perú han disminuido drásticamente, quedando las mayores concentraciones, básicamente confinadas a la selva central. Igualmente, las concentraciones sobre Brasil han disminuido significativamente y se encuentran en la porción sur, del este del territorio de Brasil, por su parte, en el caso de Bolivia existe un incremento de las concentraciones en su porción noreste.

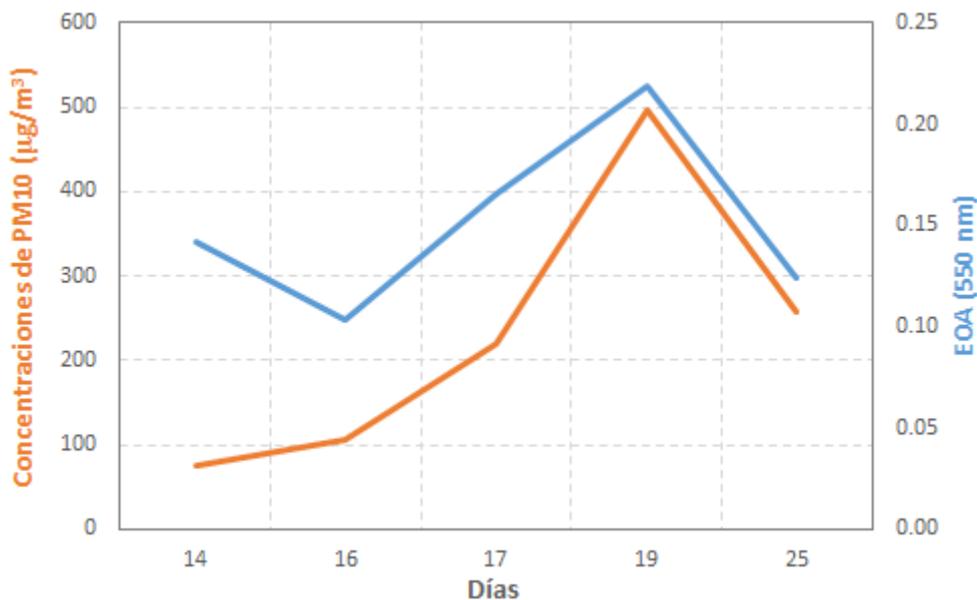
**Figura 23.**  
**Concentraciones medias mensuales de material particulado (PM10), generadas por el modelo WRF-CHEM en unidades  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , para los meses de agosto a); septiembre b) y octubre c).**



Fuente: Elaborado por Dr. Aldo Moya.

En la Figura 24 se muestra la comparación entre las curvas de concentraciones de PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y EOA (500 nm) para los días seleccionados como casos de estudio. En el caso de los valores medios de las concentraciones, estas fueron calculadas para las coordenadas donde se encuentra instalado el fotómetro solar, teniendo en cuenta cada uno de los plazos de pronósticos.

**Figura 24.**  
**Concentraciones promedio de PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) generadas por el WRF-CHEM, sobre las coordenadas del fotómetro solar y valores de medios de Espesor Óptico por Aerosoles en la longitud de onda de 500 nm, para las fechas seleccionadas como casos de estudio.**



**Fuente:** Elaboración propia 2016.

En el caso del EOA se emplearon los valores medios calculados en el epígrafe anterior. Como se puede apreciar ambas curvas tienen comportamientos muy similares, excepto solamente para el día 14 de septiembre, donde no existe coincidencia en el comportamiento, en las fechas restantes el comportamiento es casi el mismo. El coeficiente de correlación alcanza el valor de 0,82, lo que demuestra que el modelo simula de forma correcta el comportamiento de las concentraciones de PM10, respecto a la realidad, medida como EOA por el fotómetro solar.

#### **4.1.2.2. RETROTRAYECTORIAS CON HYSPLIT**

Con el objetivo de comprobar si los aerosoles registrados por el fotómetro solar del Observatorio de Huancayo corresponden efectivamente a aquellos generados por la quema de biomasa, se determinarán las retro trayectorias para los casos de estudios previamente seleccionados. A partir de las retro trayectorias obtenidas, estas se harán corresponder con información de los focos y emisiones de los incendios para cada día. De esta forma se podrá determinar si las masas de aires, en alguno de los

niveles de altura seleccionados (500, 1500 y 3000 metros sobre el nivel del suelo (msns)), efectivamente, ha tenido su trayectoria sobre estos puntos.

Para las corridas del HYSPLIT se seleccionaron previamente las coordenadas donde se encuentra ubicado el fotómetro, se determinó la hora de ocurrencia de los máximos valores de EOA para los días analizados y a partir de esta hora se corrió 72 horas hacia atrás el modelo. Los datos meteorológicos empleados por el modelo corresponden al Sistema de Asimilación de Datos Globales (GDAS, por sus siglas en inglés). Los niveles de alturas seleccionados para cada corrida son los mencionados en el párrafo anterior. En los subsiguientes epígrafes se realizará el análisis para cada uno de los días considerados como casos de estudio.

#### **4.1.2.2.1. Primer caso de estudio**

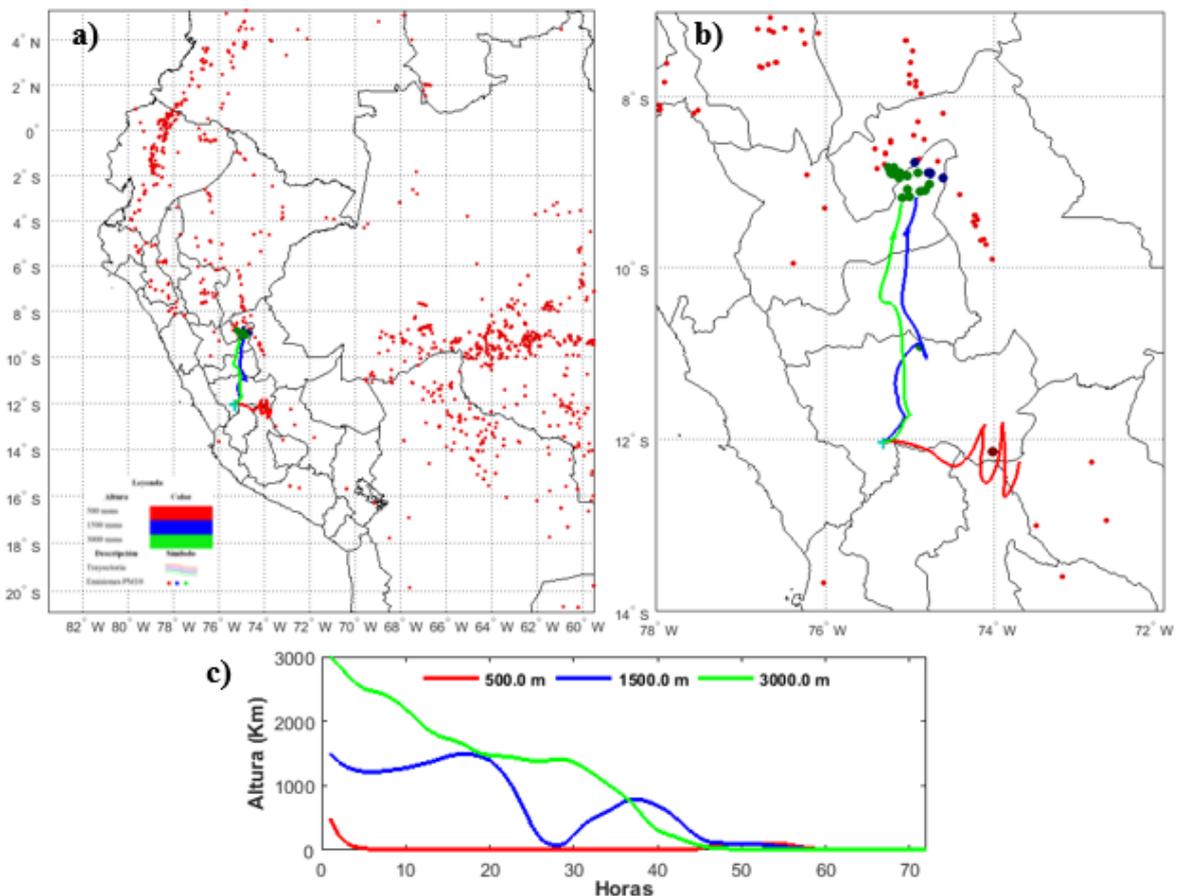
Este fue registrado el 14 de septiembre de 2015 entre las 17:02 – 18:47 horas UTM. En la Figura 25 se representan las curvas de las retro trayectorias correspondientes a cada uno de los niveles de altura seleccionados, así como los puntos de focos de incendios para toda la región de estudio (Figura 25 a). Para una mejor apreciación se muestra en la (Figura 25 b), una ampliación en torno al sitio donde se encuentra ubicado el fotómetro solar y finalmente en la (Figura 25 c) se muestran las curvas que representan los niveles seleccionados, en el lapso de las 72 horas seleccionadas para realizar el cálculo de las retro trayectorias. El valor cero corresponde al horario específico de la medición del fotómetro para el caso que se analiza, a partir del cual, se comienza el cálculo de las retro trayectorias. Para determinar los focos de incendios que puedan caer dentro de las trayectorias, se estableció un criterio de selección espacial de 25 km de radio. Los puntos de incendio resaltados en mayor diámetro y diferenciados en color marrón, azul y verde, corresponden a los puntos coincidentes con las trayectorias a los niveles de 500, 1500 y 3000 msns, respectivamente.

Para este caso en específico, en el nivel de 500 msns se encuentran 2 focos ubicados contiguamente, ambos es Junín, con una emisión

promedio entre ambos de 73646,54 Kg-PM10/día, por su parte con el nivel de 1500 msns coinciden 23 focos de quema de biomasa, con una emisión promedio de 57657,10 Kg-PM10/día, precisamente justo donde comienza la trayectoria para este nivel. Por último, en el caso del nivel de 3000 msns, que al igual que en el nivel intermedio los focos coincidentes se encuentran prácticamente todos justo donde se inicia esta trayectoria, el promedio de emisiones para un total de 19 focos es de 55928,76 Kg-PM10/día. En el caso de estos dos últimos niveles, la mayoría de los incendios tienen lugar fundamentalmente en la provincia de Huánuco con algunos registrados en Ucayali, no obstante, ambos casos coinciden con un foco ubicado en Junín.

**Figura 25.**

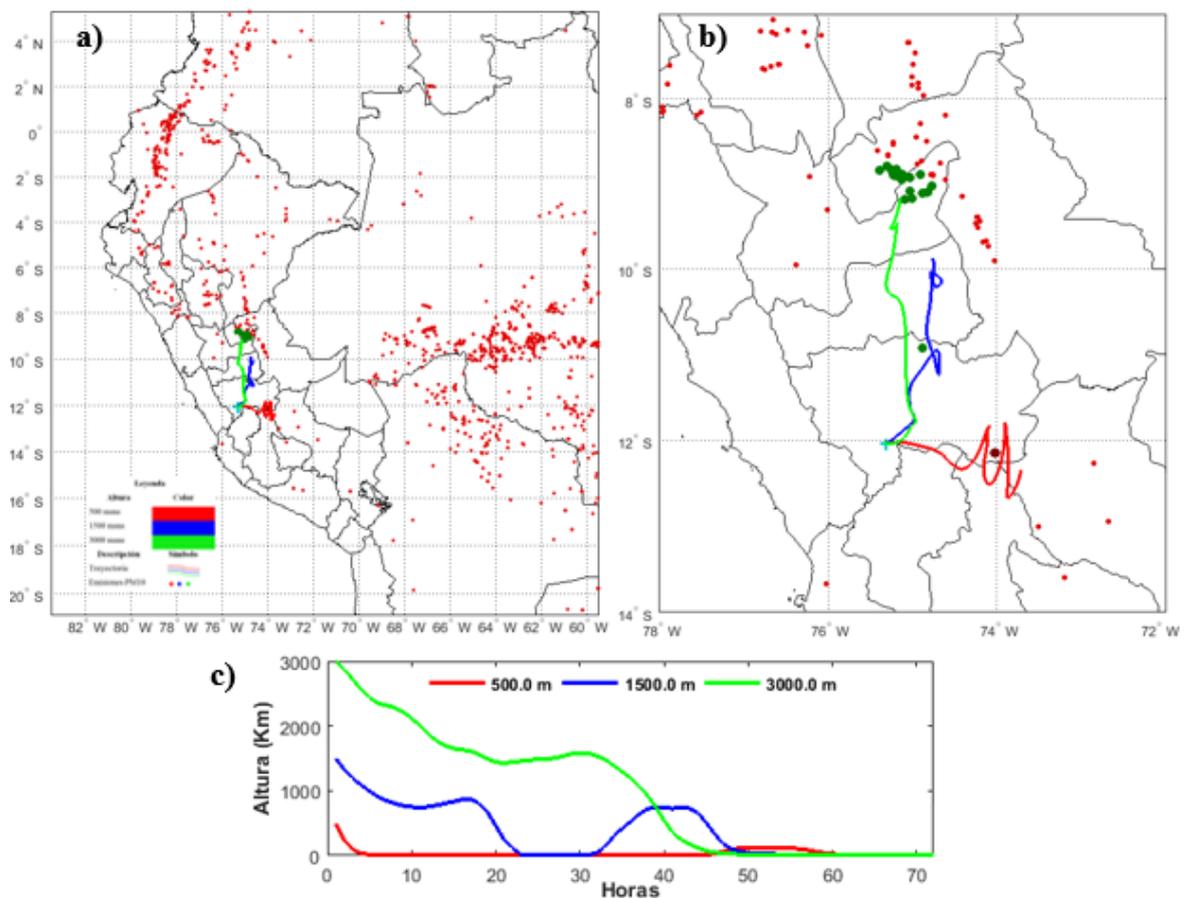
**Análisis de las retro trayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 14 de septiembre en el horario de las 17:00 UTM.**



Fuente: Elaboración propia en base a los datos de HYSPLIT, 2016.

En la Figura 26 se representa el análisis para el horario de las 18:00 UTM del mismo día 14 de septiembre. En el caso del primer nivel (500 msns), los dos fuegos que fueron registrados en el horario de las 17:00 UTM persisten en este horario con los mismos valores de emisiones, en el caso de la trayectoria del nivel intermedio, esta comienza, para este horario, en territorio de Cerro de Pasco por lo que en su trayectoria solamente se encuentra con un foco en Junín cuya emisión es de 1417.319 Kg-PM10/día. La trayectoria del nivel de 3000 msns, al igual que en el horario anterior, tiene su origen en Huánuco, pero en esta ocasión se incrementó en 2 el número de focos llegando a 21 en total con emisiones promedio de 54508,5 Kg-PM10/día, algo inferiores en relación con el horario anterior.

**Figura 26.**  
**Análisis de las retro trayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 14 de septiembre en el horario de las 18:00 UTM.**



Fuente: Elaboración propia en base a los datos de HYSPLIT, 2016.

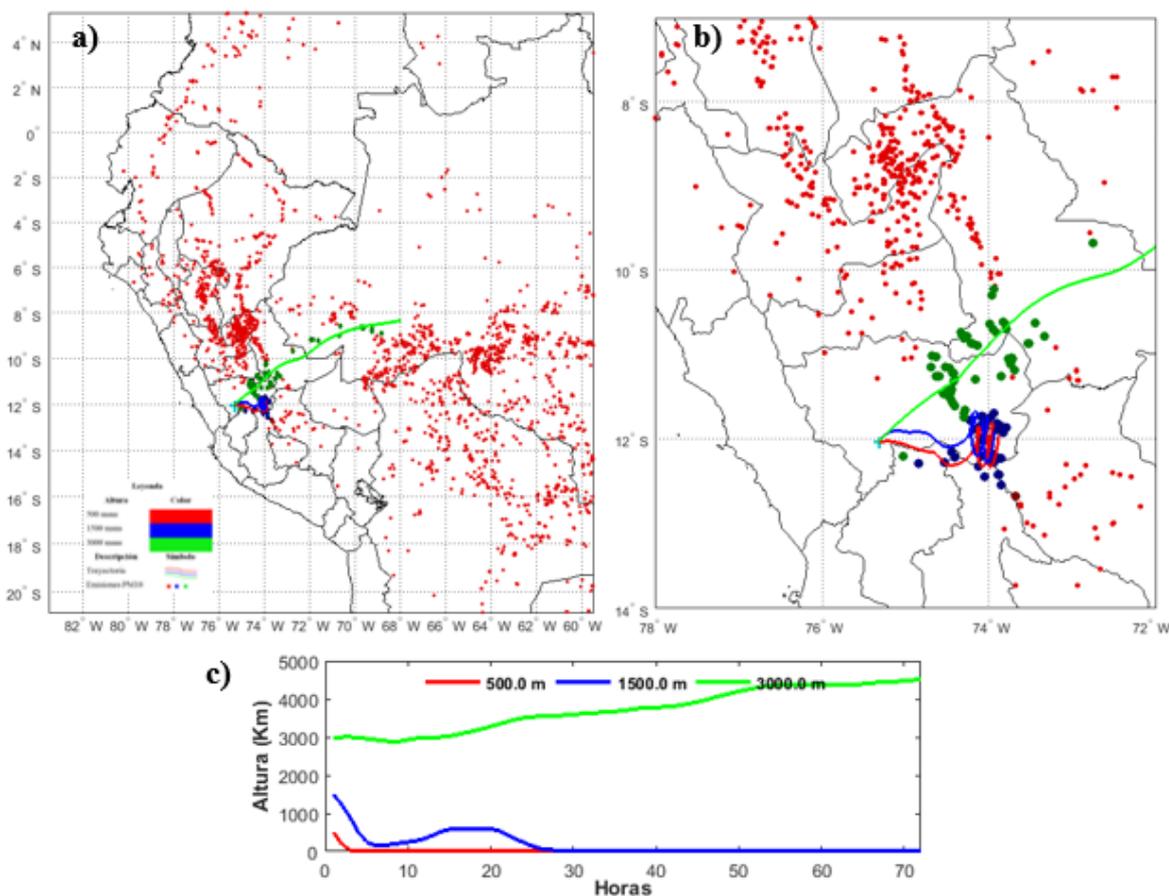
#### **4.1.2.2. Segundo caso de estudio**

Este caso corresponde al 16 de septiembre de 2015 entre las 18:27 - 18:35 UTM. Por tal motivo, se corrió el modelo con hora de inicio a las 18:00 UTM, con las mismas especificaciones y demás datos generales que fueron descritos para el primer caso. En la Figura 27 se representan las trayectorias resultantes de esta corrida. Las trayectorias de 500 y 1500 msns son muy similares y ambas se originan y transcurren, prácticamente todo el tiempo, sobre la región Junín, solamente en el caso de la trayectoria intermedia, esta transcurre en algún momento sobre una pequeña porción del territorio norte de Ayacucho y Huancavelica (Figura 27-b). Sin embargo, algunos focos originados en Madre de Dios coinciden con estas trayectorias.

En el caso del nivel de 500 msns un total de 47 focos de incendios coinciden con la trayectoria con emisiones promedio de 67490,73 Kg-PM10/día, por su parte con el nivel intermedio coinciden 54 focos con emisiones promedio algo inferiores al nivel más bajo (61202,293 Kg-PM10/día). El nivel de 3000 msns tiene su origen sobre Brasil, como puede apreciarse en la Figura 27-a. Un total de 12 focos se localizan sobre este país con un aporte promedio de 51867,17 Kg-PM10/día. Sobre Perú se encuentran un total de 50 focos, localizados básicamente sobre Ucayali y Junín, con un aporte a esta trayectoria de 55351,31 Kg-PM10/día. En el caso de esta trayectoria, a diferencia de los análisis anteriores, transcurre todo el tiempo por encima de los 3000 msns.

Figura 27.

Análisis de las retro trayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 16 de septiembre en el horario de las 18:00 UTM.



Fuente: Elaboración propia en base a los datos de HYSPLIT, 2016.

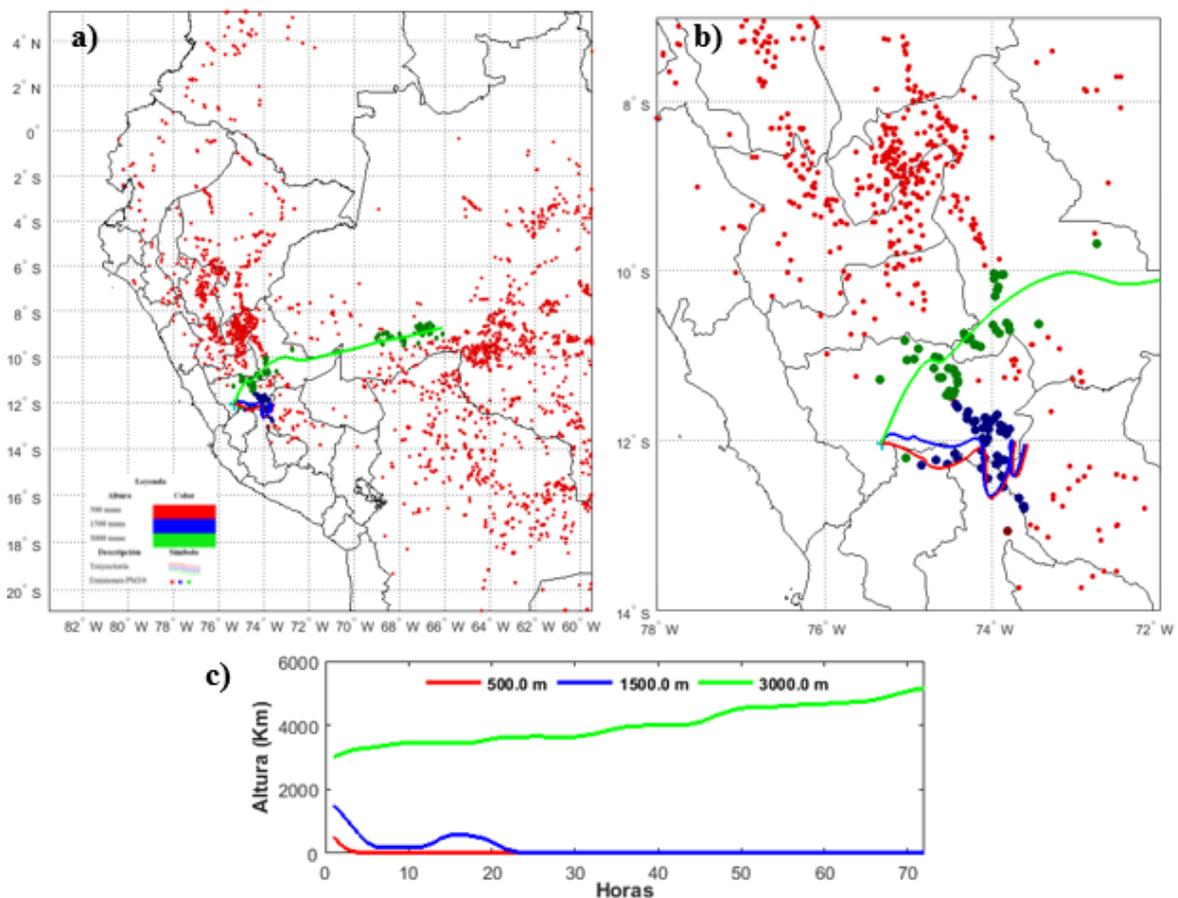
Su origen, de hecho, se encuentra por encima de los 4000 msns, por lo que, en este caso en particular, no podría asumirse del todo que los focos coincidentes con este nivel hayan aportado aerosoles originados por la quema de biomasa, a la medición realizada en este horario por el fotómetro solar. No obstante, el aporte de los niveles inferiores justifica suficientemente los valores de EOA registrados por el CIMEL en este horario.

#### 4.1.2.2.3. Tercer caso de estudio

Se registró el 17 de septiembre de 2015 entre las 17:32 – 19:18 UTM. Se corrió el modelo para las 18:00 y las 19:00 horas UTM. El comportamiento

de las trayectorias en ambos horarios (Figura 28 y Figura 29), es prácticamente el mismo y muy similar al del caso de estudio anterior, lo que sugiere que los focos de incendios analizados anteriormente persistieron en el tiempo y que las masas de aire tuvieron comportamientos muy similares en ambos días. En el caso del horario de las 18:00 en las trayectorias de 500 y 1500 msns resultaron coincidentes 49 y 51 focos de incendios, respectivamente. Para ambos niveles resultaron coincidentes prácticamente los mismos focos ubicados en Cusco, Ayacucho, Huancavelica y Junín. Las emisiones promedio de los focos que contribuyeron en estas trayectorias tienen prácticamente la misma magnitud, o sea, 31598,733 y 32504,128 Kg-PM10/día, respectivamente.

**Figura 28.**  
**Análisis de las retro trayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 17 de septiembre en el horario de las 18:00 UTM.**



Fuente: Elaboración propia en base a los datos de HYSPLIT, 2016.

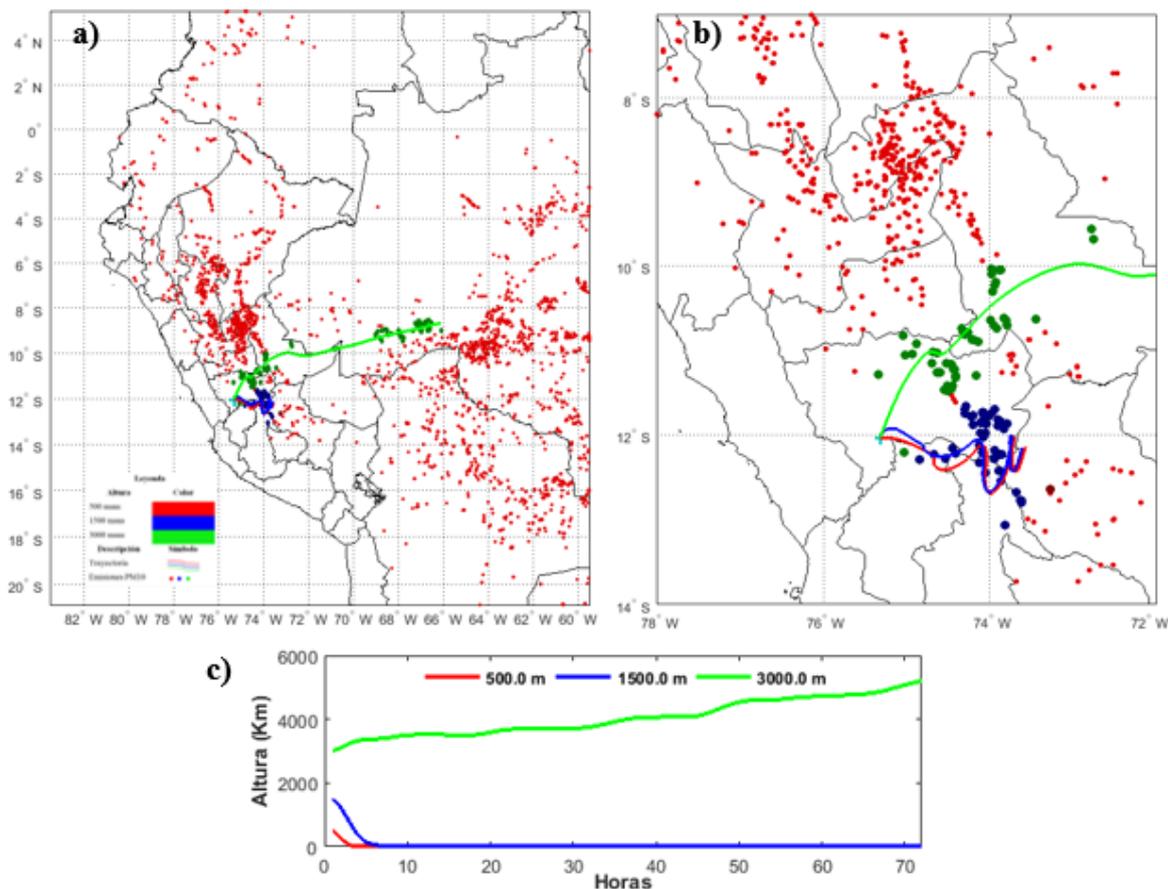
En el nivel de 3000 msns al igual que para el día anteriormente analizado, esta trayectoria comienza en Brasil y permanece todo el tiempo por encima de los 3000 metros, de hecho, su origen se ubica tanto en el horario de las 18:00 como en el de las 19:00 UTM por encima de los 5000 metros (Figura 28-c y Figura 29-c). Un total de 57 focos coinciden en esta trayectoria sobre territorio de Brasil con una emisión promedio de 71616,34 128 Kg-PM10/día. Ya en territorio peruano la cantidad de focos coincidentes es de 46, lo cual suma entre ambos un total de 103 focos para este nivel de trayectoria. Las emisiones promedio de este nivel sobre Perú son de 27710,73 Kg-PM10/día. Los focos en Perú se ubican en Ucayali, Cerro de Pasco y Junín.

Como se mencionó anteriormente los dos horarios de este día tienen un comportamiento prácticamente exacto. De hecho, en los dos primeros niveles el número de foco permanece igual al horario anterior (Figura 29), con emisiones que se encuentran en el mismo orden de magnitud y ubicadas en las mismas regiones.

En el nivel de 3000 msns la diferencia en cuanto al total de focos es de solamente uno menos en este horario. En territorio brasileño el número de focos disminuyó a 54, tres menos en comparación con el horario anterior, mientras que las emisiones promedio se incrementaron ligeramente llegando a 72304,09 Kg-PM10/día. Sobre Perú el número de focos ascendió de 46 a 48 aunque las emisiones se mantuvieron en el mismo rango. El análisis realizado en el caso de estudio anterior para el nivel de 3000 msns es válido también para los dos horarios de este día.

**Figura 29.**

**Análisis de las retro trayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 17 de septiembre en el horario de las 19:00 UTM.**



Fuente: Elaboración propia en base a los datos de HYSPLIT, 2016.

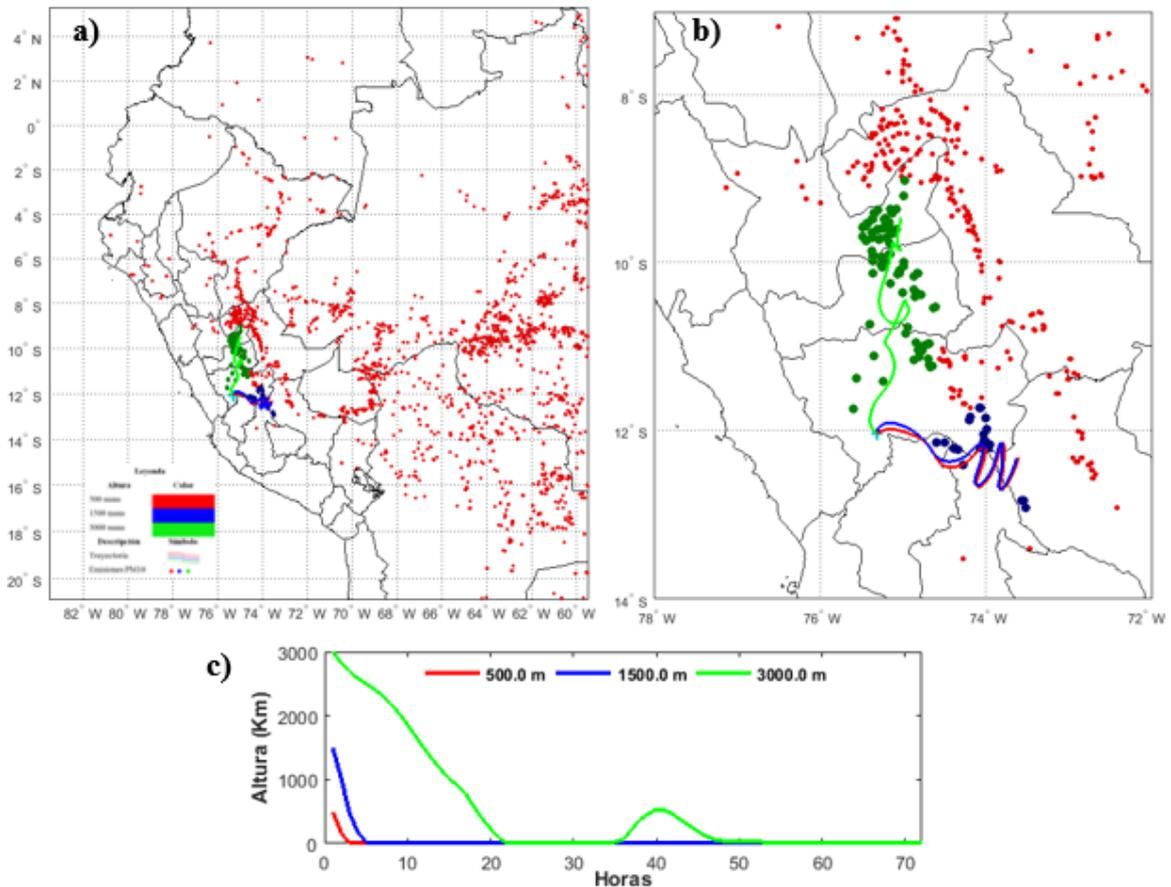
#### 4.1.2.2.4. Cuarto caso de estudio

Registrado el 19 de septiembre de 2015 entre las 17:20 y 19:06 horas UTM, las corridas se realizaron para los horarios de las 18:00 y 19:00 UTM. En las Figuras 30 y 31 se representan las retro trayectorias para los dos horarios antes mencionados. Como se puede apreciar, al menos desde el punto de vista visual, el comportamiento de ambos horarios es prácticamente el mismo para todos los niveles. En el caso de los dos primeros niveles, ambos son exactamente iguales en ambos horarios, tanto en cuanto a número de focos como a las emisiones promedio. En el caso del número de focos en el nivel de 500 msns estos suman 19 con una emisión promedio de 27064,23 Kg-PM10/día. En el nivel intermedio los focos alcanzan el valor de 21 con una emisión promedio de 28226,649

Kg-PM10/día. En ambos niveles los focos se encuentran localizados en Cusco, Ayacucho, Huancavelica y Junín.

**Figura 30.**

**Análisis de las retro trayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 19 de septiembre en el horario de las 18:00 UTM.**

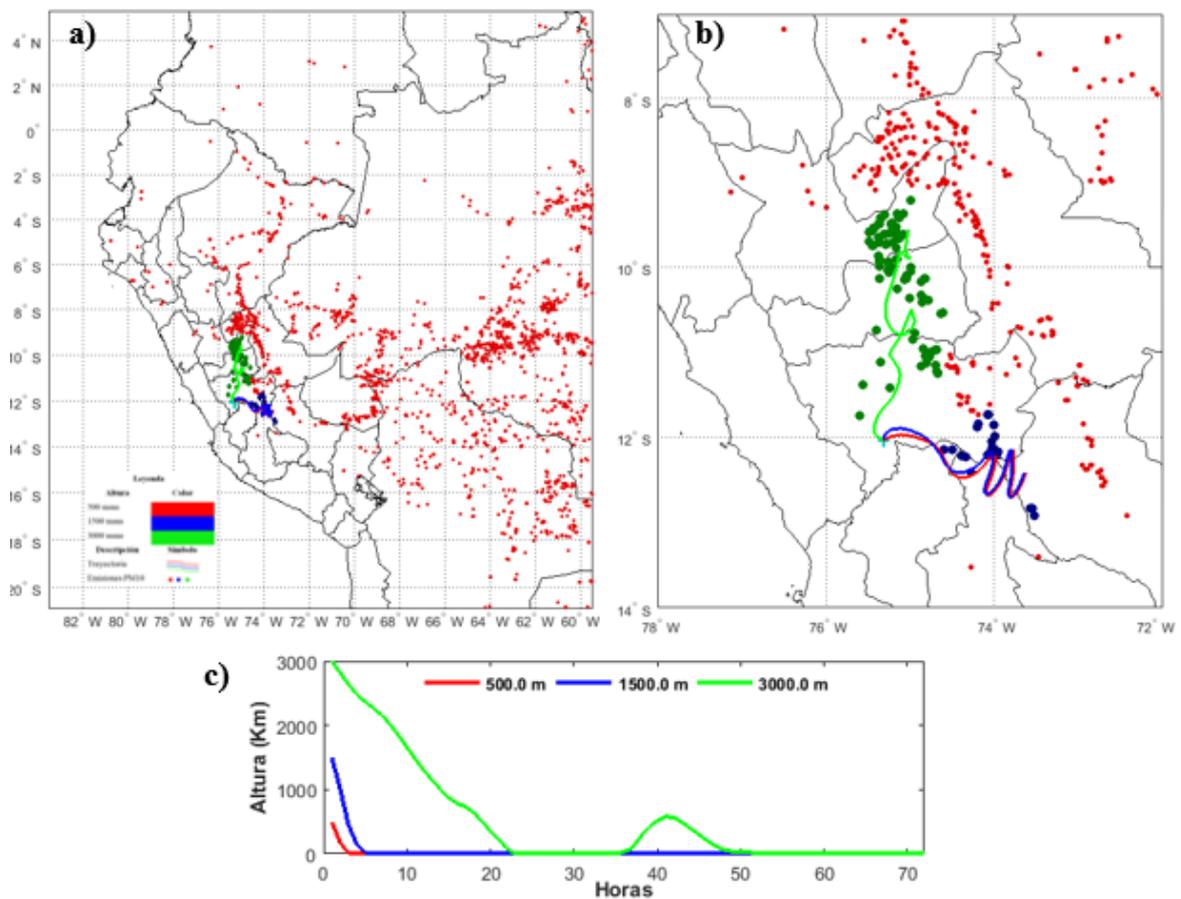


**Fuente: Elaboración propia en base a los datos de HYSPLIT, 2016.**

En la trayectoria del nivel de 3000 msns es donde se presentan ligeras diferencias entre ambos horarios. El número de focos en el horario de las 18:00 es de 90 mientras que en el horario de las 19:00 UTM estos disminuyeron a 88. Por su parte las emisiones en el primer horario son de 31781,79 Kg-PM10/día, ligeramente inferiores al horario de las 19:00 UTM, cuya magnitud es de 32014,757 Kg-PM10/día. Para este nivel de trayectoria todos los focos coincidentes se encuentran en Perú, en las regiones de Huánuco, Cerro de Pasco y Junín. En los horarios analizados

de este día, a diferencia de los dos casos de estudios analizados previamente, la trayectoria de los 3000 msns transcurre todo el tiempo a nivel del suelo, como claramente se puede apreciar en la Figura 30-c y en la Figura 31-c. Es en las últimas 24 horas cuando comienza el ascenso de las masas de aire conteniendo las partículas generadas por la quema de biomasa, alcanzando los 3000 msns entorno al horario de medición del fotómetro solar.

**Figura 31.**  
**Análisis de las retro trayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 19 de septiembre en el horario de las 19:00 UTM.**



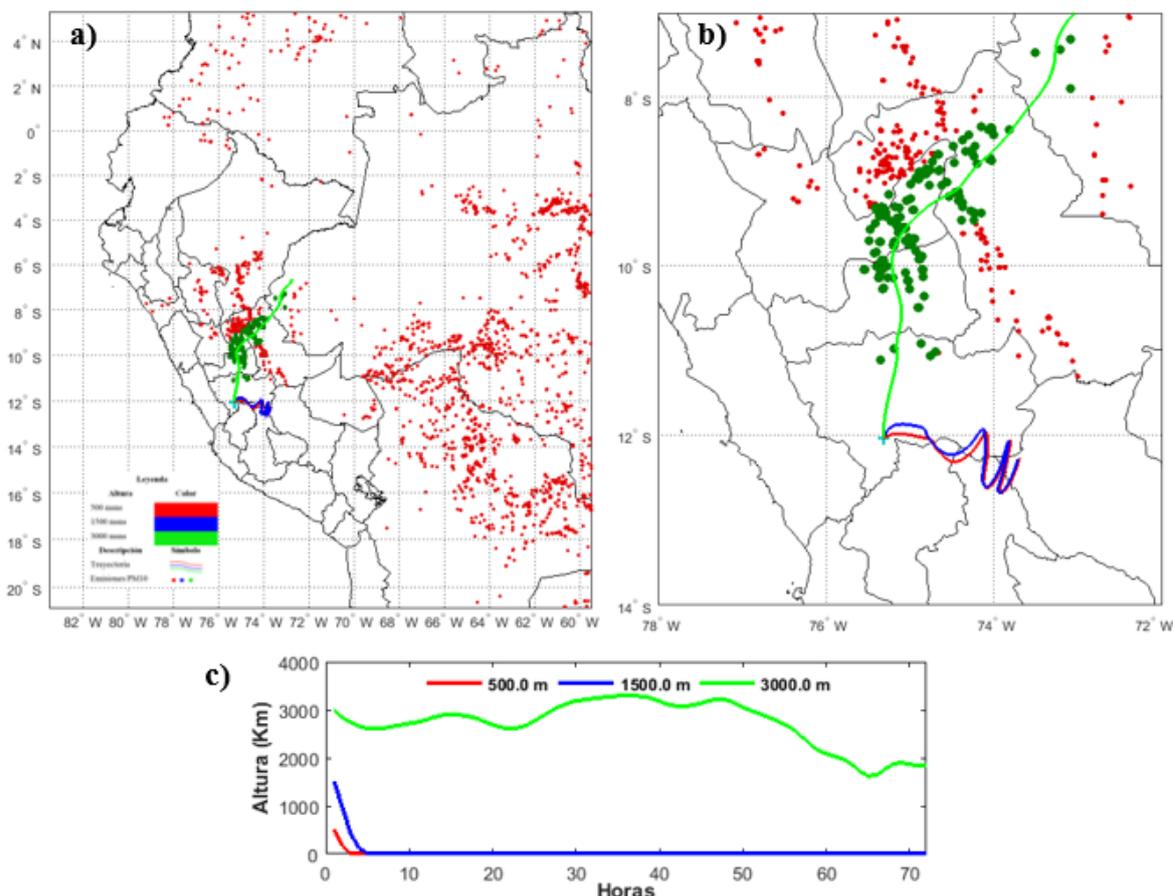
Fuente: Elaboración propia en base a los datos de HYSPLIT, 2016.

#### **4.1.2.2.5. Quinto caso de estudio**

Este caso fue registrado el día 25 de septiembre de 2015 entre las 18:21 - 18:29 horas UTM, por tal motivo el análisis de las retro trayectorias se realizó solamente para el horario de las 18:00 UTM por ser el más próximo (Figura 32). En este caso, a diferencia de todos los anteriormente analizados, no se registraron focos coincidentes con los dos primeros niveles de trayectoria. Sin embargo, por otro lado, se registra en el nivel de 3000 msns el mayor número de focos coincidentes (141), para cualquiera de los niveles hasta ahora analizados. Esta trayectoria tiene su origen en Brasil, pero solamente 5 focos coinciden con esta trayectoria en este país con una emisión promedio de 79168,5 Kg-PM10/día. Los 136 focos restantes se encuentran todos en territorio de Perú ubicados en las regiones de Ucayali, Huánuco, Cerro de Pasco y Junín. Las emisiones promedio de estos focos son de 63947,17 Kg-PM10/día. Como en algunos de los casos anteriormente analizados, la trayectoria de este nivel no tiene lugar a nivel del suelo, comienza a algo menos de los 2000 msns, en el plazo de las 72 horas y se mantiene por debajo de esta altura hasta unas 10 horas (Figura 32-c). Sin embargo, ya a partir del plazo de las 62 horas asciende por encima de los 2000 msns y se mantiene, fluctuando, incluso por encima de los 3000 msns hasta llegar al plazo cero. A pesar de esto, no se puede descartar que algunos de estos focos de incendios hayan contribuido, a lo largo de la trayectoria, con los valores de EOA registrados en el Observatorio de Huancayo. Los procesos convectivos que tienen lugar en esta capa de la atmósfera pueden haber contribuido a que las partículas originadas por la quema de biomasa alcanzaran esta trayectoria en algún momento.

Figura 32.

Análisis de las retro trayectorias para los niveles de 500, 1500 y 3000 msns y su relación con las emisiones de PM10 (Kg-PM10/día) en área de 50 km entorno a la trayectoria, correspondientes al día 25 de septiembre en el horario de las 18:00 UTM.



Fuente: Elaboración propia en base a los datos de HYSPLIT, 2016.

#### 4.1.3. DETERMINACIÓN DEL FORZAMIENTO RADIATIVO EN HUANCAYO A TRAVÉS DEL MODELO SBDART

En este capítulo se analizará si ha existido influencia o no de los aerosoles atmosféricos, generados por la quema de biomasa sobre la radiación solar. Con este objetivo se han empleado los casos de estudios seleccionados en el capítulo anterior y que han sido objeto de análisis en dicho capítulo. A partir de la información derivada de las mediciones realizadas por el fotómetro solar (Tabla 4), que caracterizan los aerosoles medidos en el Observatorio de Huancayo, se determinaron los flujos radiativos y a partir de estos el Forzamiento Radiativo por Aerosoles.

#### **4.1.3.1. Análisis de la variación en los flujos por día**

A partir de los resultados obtenidos se realizará en este epígrafe el análisis de cada uno de los días seleccionados. A partir de los gráficos generados se presentarán los gráficos de los resultados por días, los que muestran la variación de los flujos ascendentes y descendentes tanto en el tope de la atmósfera como en la superficie.

##### **a) Día 14 de septiembre (257)**

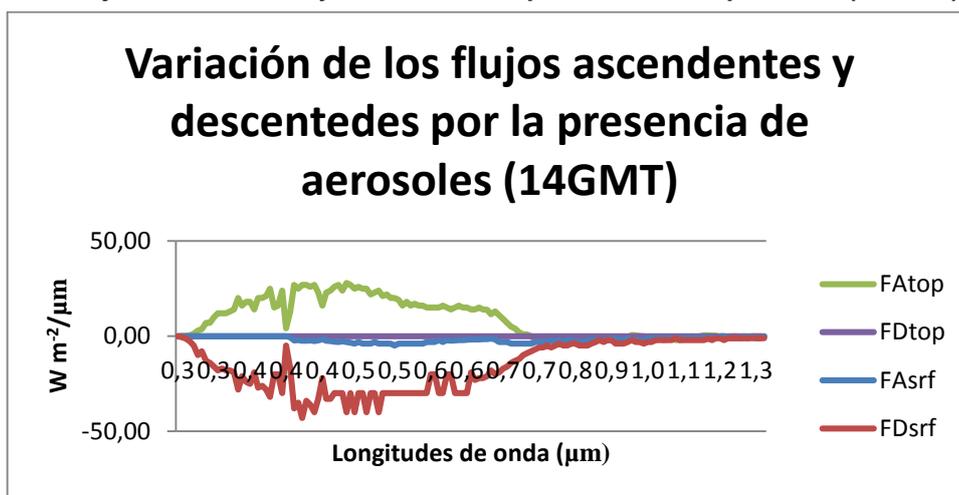
Tanto en la Figura 33, como en el resto de las figuras que serán analizadas, se representan los flujos ascendentes y descendentes tanto en el Tope de la Atmósfera (TOP) como en Superficie (SRF) expresados en unidades de radiancias por longitud de onda ( $Wm^{-2}/\mu m$ ). En esta figura se representa el comportamiento de los flujos para cada longitud de onda del espectro solar en el rango entre los 0,3 y los 1,3  $\mu m$ , con un incremento de 0,01  $\mu m$ .

En las Figura 33 y Figura 34 se representa cómo han variado los flujos radiativos, tanto el flujo ascendente como el descendente en el TOP y la SRF. En el caso del TOP se ve una gran variación con respecto al flujo ascendente, producto de los flujos radiativos dispersados por los aerosoles. Las máximas variaciones corresponden al intervalo de las longitudes de onda que van desde 0,35 a 0,5  $\mu m$ . Esto coincide con lo mencionado anteriormente, respecto a que los aerosoles generados por la quema de biomasa presentan una mayor interacción con la energía radiativa en este intervalo de longitud de onda, lo que está siendo corroborado con estos gráficos. Para las 14 UTM el valor máximo de variación de flujo de energía es de  $28 Wm^{-2}/\mu m$  en la longitud de onda de 0,457  $\mu m$ , mientras que para las 17 UTM es de  $25 Wm^{-2}/\mu m$  a 0,378  $\mu m$ . El flujo de energía ascendente empieza a tomar valores negativos, es decir, disminuye a partir de la longitud de onda de 0,733  $\mu m$  con un valor de  $-2 Wm^{-2}/\mu m$ . En adelante se verá como esto afecta el forzamiento radiativo. Por otro lado, el flujo descendente en el TOP no presenta variación.

En superficie el comportamiento es opuesto a lo que sucede en el TOP, en este caso el flujo descendente tiene mayor variación, la cual es negativa. Así tenemos que el máximo valor de variación es de  $-43 Wm^{-2}/\mu m$ .

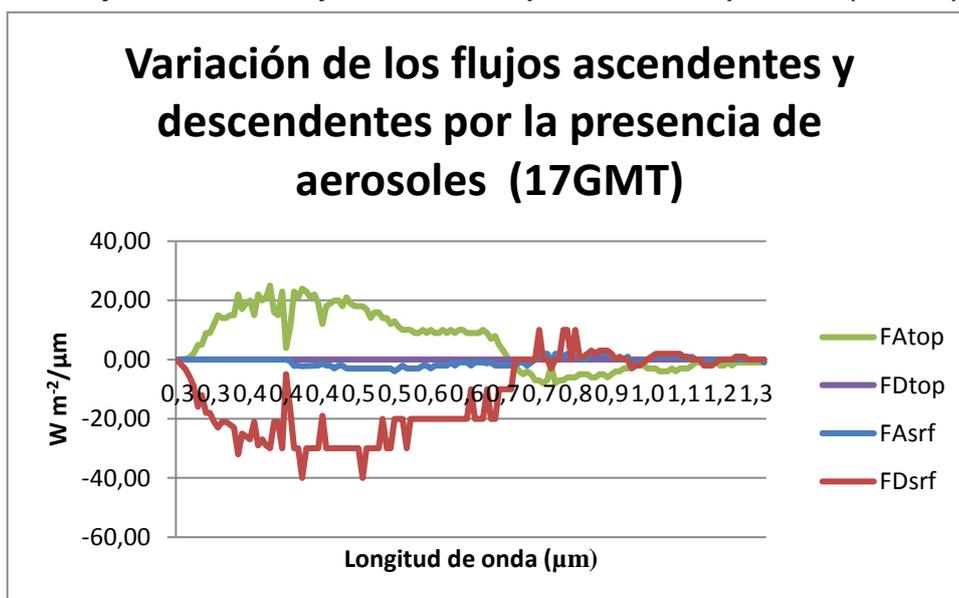
$^2/\mu\text{m}$  a una longitud de onda de  $0,410 \mu\text{m}$  (14 UTM) y  $-40 \text{ W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$  a  $0.409 \mu\text{m}$  (17 UTM). A las 14 UTM la tendencia se mantiene con una variación negativa, sin embargo, a las 17 UTM esto cambia, alcanzando variaciones positivas, los valores máximos en ese sentido son de  $10 \text{ W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$  registrado en las longitudes de onda de  $0,74$ ;  $0,78$ ;  $0,79$ ; y  $0,81 \mu\text{m}$ . Respecto al flujo ascendente no presenta una variación significativa.

**Figura 33.**  
Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 14 de septiembre (14 UTM).



Fuente: Elaboración propia 2016.

**Figura 34.**  
Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 14 de septiembre (17 UTM).



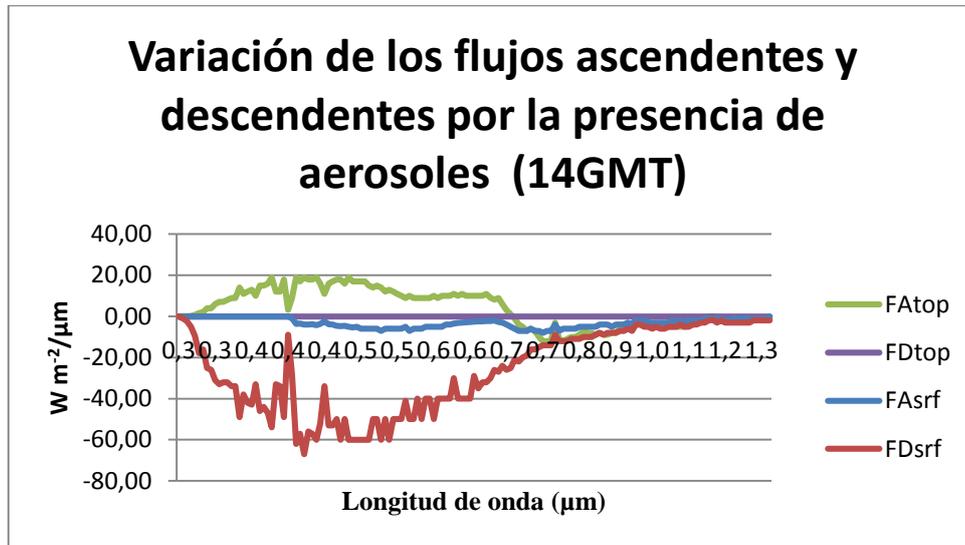
Fuente: Elaboración propia 2016.

El EOA y el Coeficiente de Angstrom son dos de las principales propiedades de los aerosoles que determinan esta variabilidad. A las 14 UTM se registró un EOA de 0.10006 con un Coeficiente de Angstrom de 1,54; mientras tanto, a las 17 UTM el EOA fue de 0,103 con un Coeficiente de Angstrom de 1,878. Como se observa, a mayor espesor óptico y Coeficiente de Angstrom, mayor variabilidad en los flujos.

#### **b) Día 16 de septiembre (259)**

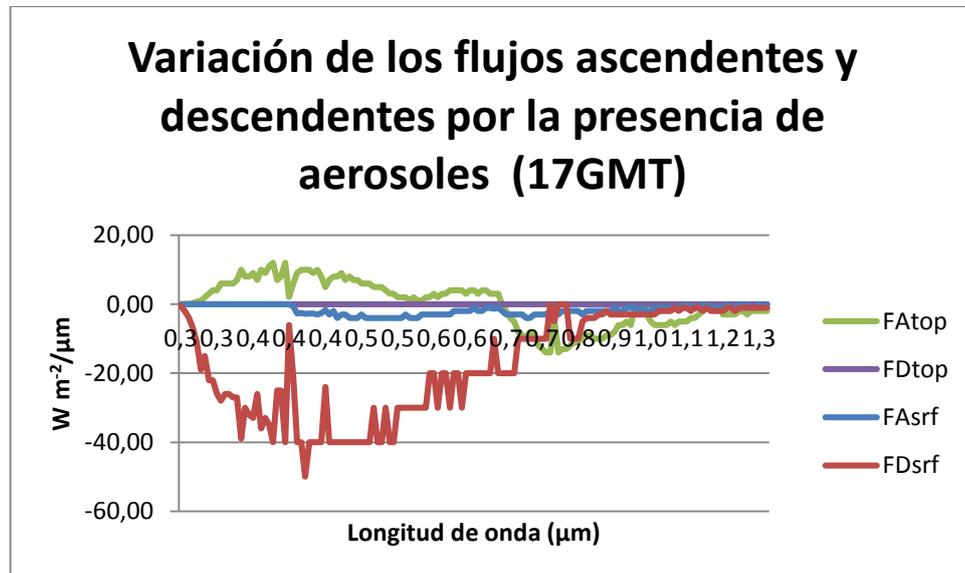
Las Figura 35, Figura 36 y Figura 37 muestran la variabilidad de los flujos a lo largo del día 259. En el caso del TOP se observa una variabilidad significativa en el caso del flujo ascendente, contrario a lo ocurrido en la SRF. A las 14UTM se obtuvo la variación máxima en el TOP con un valor de  $19 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  a una longitud de onda de  $0,378 \mu\text{m}$ , de  $12 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  dentro de la longitud de onda de  $0,390 \mu\text{m}$  para las 17UTM y para las 20 UTM,  $21 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  en una longitud de onda de  $0,457 \mu\text{m}$ , se observa que para el caso del CENIT la variación es menor. Al igual que el 14 de septiembre, el flujo ascendente en el TOP varía negativamente. En este caso, esto sucede a partir de una longitud de onda de  $0,690 \mu\text{m}$  con  $-1 \text{ W Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  (14 UTM),  $0,677 \mu\text{m}$  con  $-2 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  (17 UTM) y  $0,690 \mu\text{m}$  con  $-1 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  (20 UTM), similar a las horas de la mañana. Respecto a la variabilidad en SRF, la más significativa es la del flujo descendente con valores negativos llegando hasta  $-67 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  en  $0,410 \mu\text{m}$  (14 UTM),  $-50 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  también a la longitud de onda de  $0,410 \mu\text{m}$  a las 17 UTM y a las 20 UTM con  $-70 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  a la misma longitud de onda en la que ocurre la mayor variabilidad en el flujo ascendente en el TOP  $0,457 \mu\text{m}$ . Si se analiza la variabilidad respecto al flujo ascendente en SRF, no es significativa, pero cabe destacar que hay una mayor variación respecto al 14 de septiembre con tendencia negativa.

**Figura 35.**  
**Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 16 de septiembre (14UTM).**



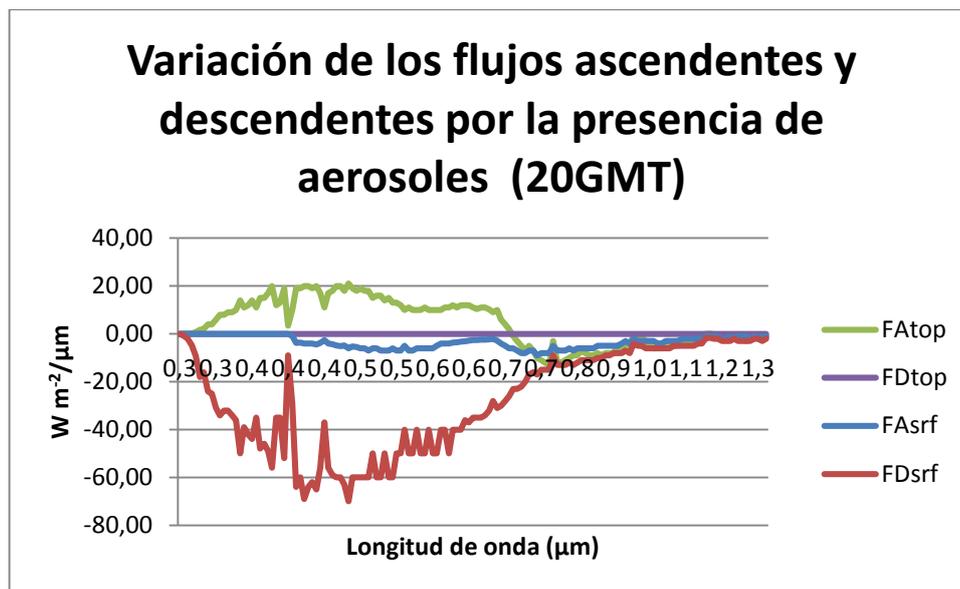
Fuente: Elaboración propia 2016.

**Figura 36.**  
**Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 16 de septiembre (17UTM).**



Fuente: Elaboración propia 2016.

**Figura 37.**  
**Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 16 de septiembre (20UTM).**



**Fuente:** Elaboración propia 2016.

El EOA y Coeficiente de Angstrom para este día en promedio de las horas analizadas fue; 0,097 y 1,766 para las 14 UTM, 0,072 y 1,614 para las 17 UTM y para las 20 UTM 0,102 y 1,718. La hora que tiene una media mayor respecto al EOA son las 20 UTM en la que se observa una mayor variación en los flujos por influencia de los aerosoles, el Coeficiente de Angstrom es mayor a las 14 UTM, pero muy pegado al registrado a las 20 UTM.

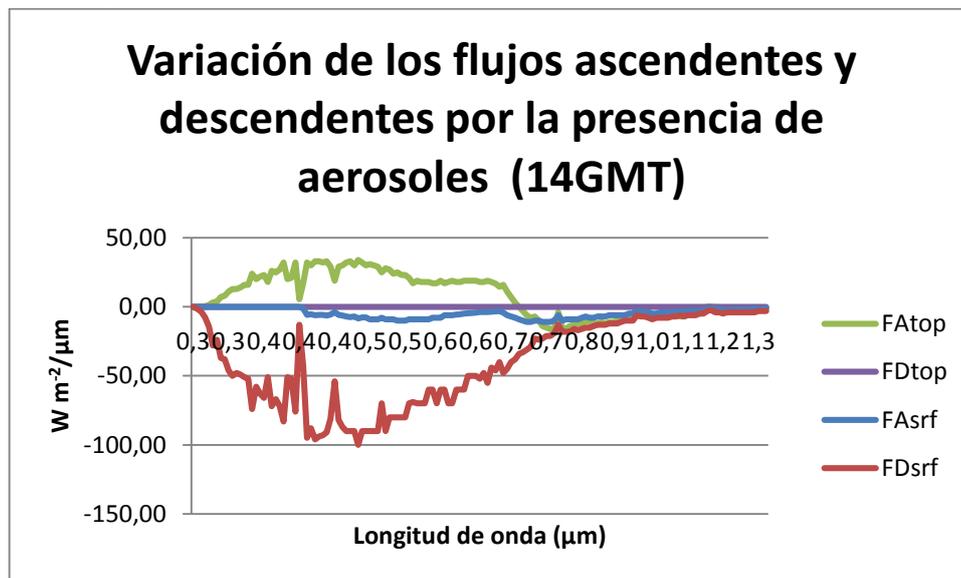
**c) Día 17 de septiembre (260):**

A continuación, se muestran las Figura 38, Figura 39 y Figura 40 para el análisis de la variación en los flujos ascendentes del TOP. De manera general se observa que tienen una variabilidad positiva, es decir, es incrementada por efecto de los aerosoles generados por la quema de biomasa. A las 14 UTM el mayor valor respecto a dicha variabilidad es de 34  $W m^2/\mu m$  en la longitud de onda de 0,457  $\mu m$ , lo que varía a las 17 UTM siendo 21  $W m^2/\mu m$  en 0,378  $\mu m$ . Esta variación se incrementa nuevamente e incluso, supera el calculado, para las 14 UTM a las 20 UTM obteniendo -40  $W m^2/\mu m$  en la misma longitud de onda que a las 14

UTM. Además, se observa que la longitud de onda de 0,457  $\mu\text{m}$  es en la que se obtienen los picos de variación. La variación empieza a tomar valores negativos a partir de la longitud de onda de 0,697  $\mu\text{m}$  con  $-3 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  a las 14 UTM, se observa una pequeña variación en el caso del calculado para las 17 UTM empezando a adquirir valores negativos en la longitud de onda de 0,677  $\mu\text{m}$  con  $-2 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  y, finalmente, a las 20 UTM, esto ocurre en la misma longitud de onda que a las 14 UTM con el mismo valor. En el caso del FDtop no hay variación.

En el caso de la superficie, la variación más significativa es la del FDsrf, la tendencia es a disminuir, el valor máximo en ese sentido es de  $-100 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  en los 0,457  $\mu\text{m}$  a las 14 UTM, en el caso de las 17 UTM fue de  $-70 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  en 0,401  $\mu\text{m}$ , a las 20 UTM de  $-110 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  en 0,410  $\mu\text{m}$ . La variación en el FAsrf es mínima.

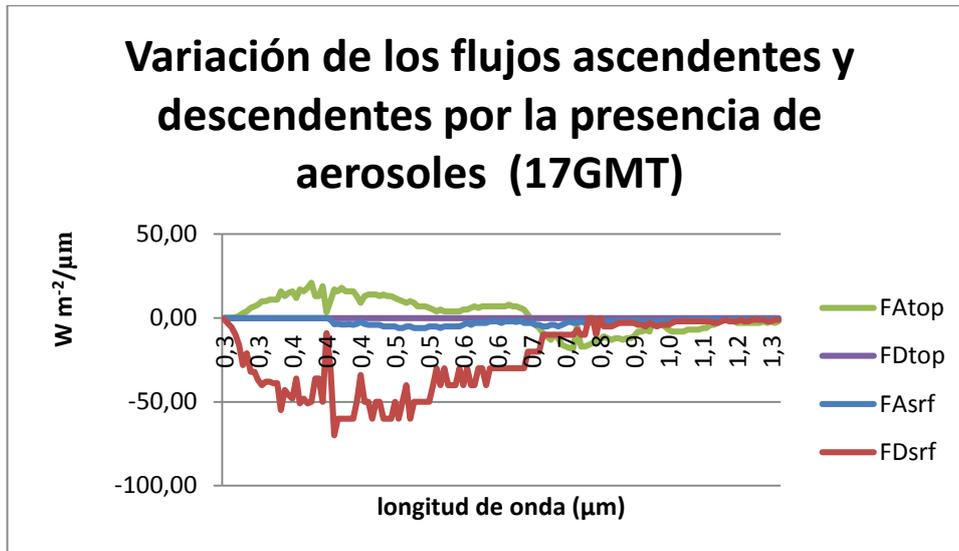
**Figura 38.**  
Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 17 de septiembre (14 UTM).



Fuente: Elaboración propia 2016.

Figura 39.

Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 17 de septiembre (17 UTM).

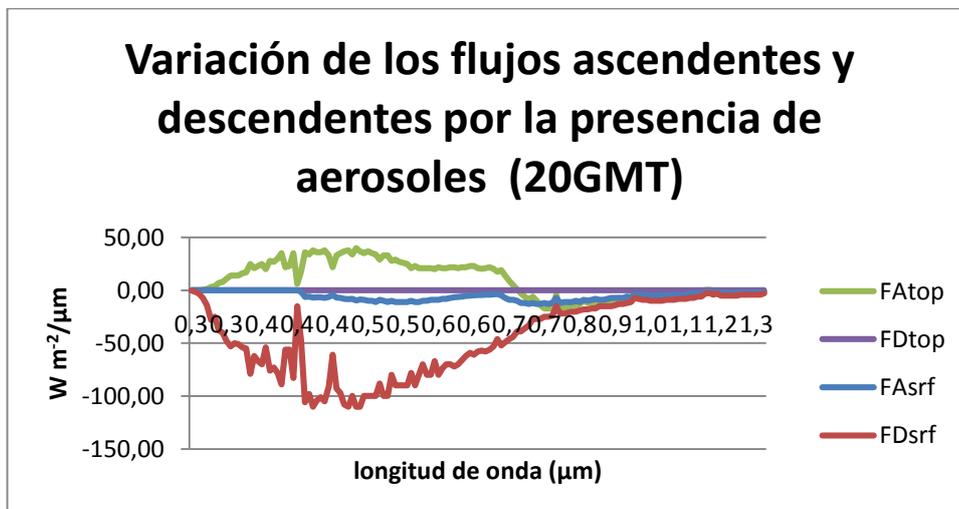


Fuente: Elaboración propia 2016.

Respecto al EOA y el Coeficiente de Angstrom tenemos para las 14 UTM 0,163 y 1,797, respectivamente. En el horario de las 17UTM 0,110 y 1,773, respectivamente y, finalmente, para las 20 UTM 0,185 y 1,584, respectivamente. El mayor EOA registrado fue a las 20 UTM y es ahí donde se da la mayor variabilidad. Respecto al Coeficiente de Angstrom el mayor es el de las 14 UTM, sin embargo, el EOA se observa con mayor influencia.

Figura 40.

Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 17 de septiembre (20 UTM).



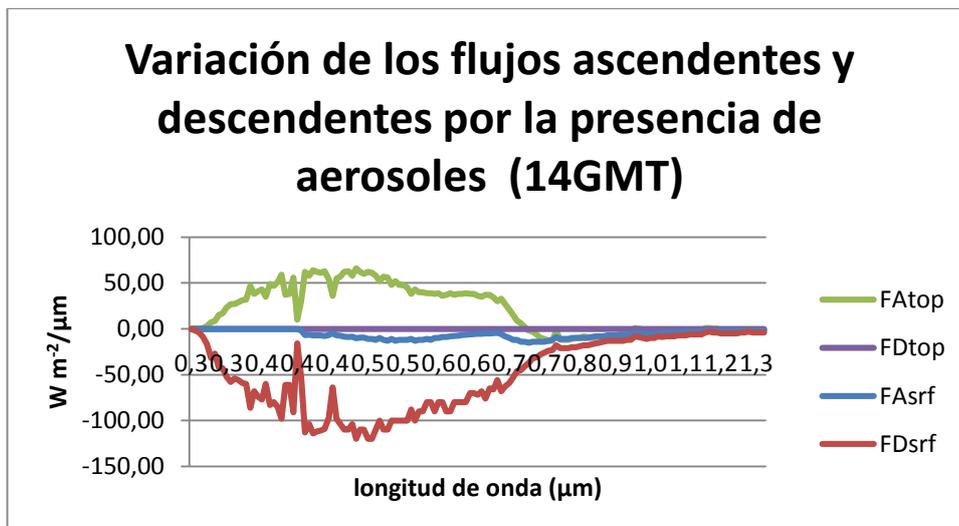
Fuente: Elaboración propia 2016.

**d) Día 19 de septiembre (262)**

En las Figura 41, Figura 42 y Figura 43 se observa la variación de los flujos. En el FAtop el valor máximo en las 14 UTM fue de  $66 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  y ocurrió en  $0,457 \mu\text{m}$ , a las 17 UTM fue  $38 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  en  $0,378 \mu\text{m}$  y las 20 UTM se repitió el mismo escenario de las 14 UTM. La tendencia cambió, obteniendo una variabilidad de valores negativos en la longitud de onda de  $0,712 \mu\text{m}$  con  $-2 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$ , con un máximo de  $-13 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  en las longitudes de onda de  $0,748$  y  $0,756 \mu\text{m}$ , esto a las 14 UTM. En el caso del CENIT ocurrió un escenario similar, en este caso se dio a  $0,690 \mu\text{m}$  con el valor de  $-3 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$ , con máximos de hasta  $-19 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  en  $0,748 \mu\text{m}$ , como en horas de la mañana. A las 20 UTM se repitió este escenario. El FDtop no tuvo variabilidad. Los valores máximos obtenidos en la variabilidad de FDsrf fue de  $-120 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  a  $0,45 \mu\text{m}$  (14 UTM), a las 17 UTM fue de  $-70 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  en la misma longitud de onda que del pico de FAtop, y a las 20 UTM se repite lo ocurrido. El FAsrf tiene poca variabilidad.

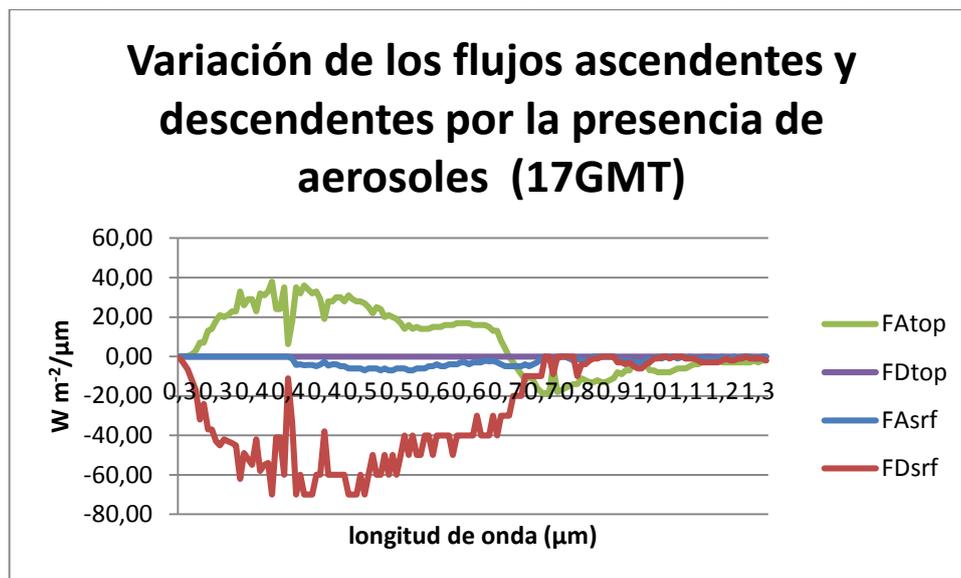
Los valores de EOA y Coeficiente de Angstrom en este día fueron  $0,274$  y  $1,825$  a las 14 UTM,  $0,184$  y  $1,804$  a las 17 UTM y  $0,246$  con  $1,59$  de Coeficiente de Angstrom para las 20 UTM. El mayor valor de EOA y Coeficiente de Angstrom corresponde al día en el que se registró mayor variabilidad tanto en el FAtop como en el FDsrf.

**Figura 41.**  
**Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 19 de septiembre (14 UTM).**



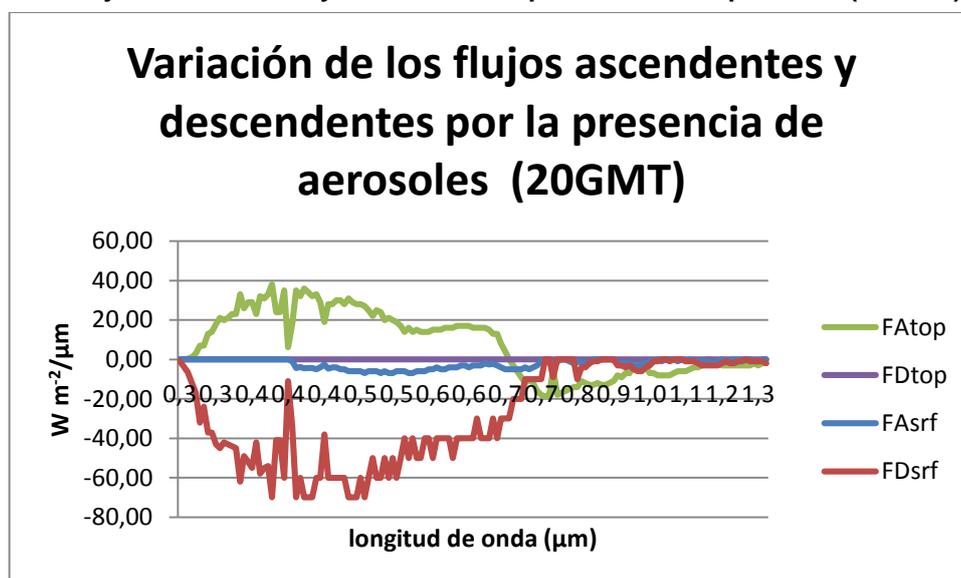
Fuente: Elaboración propia 2016.

**Figura 42.**  
**Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 19 de septiembre (17 UTM).**



Fuente: Elaboración propia 2016.

**Figura 43.**  
**Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 19 de septiembre (20 UTM).**



Fuente: Elaboración propia 2016.

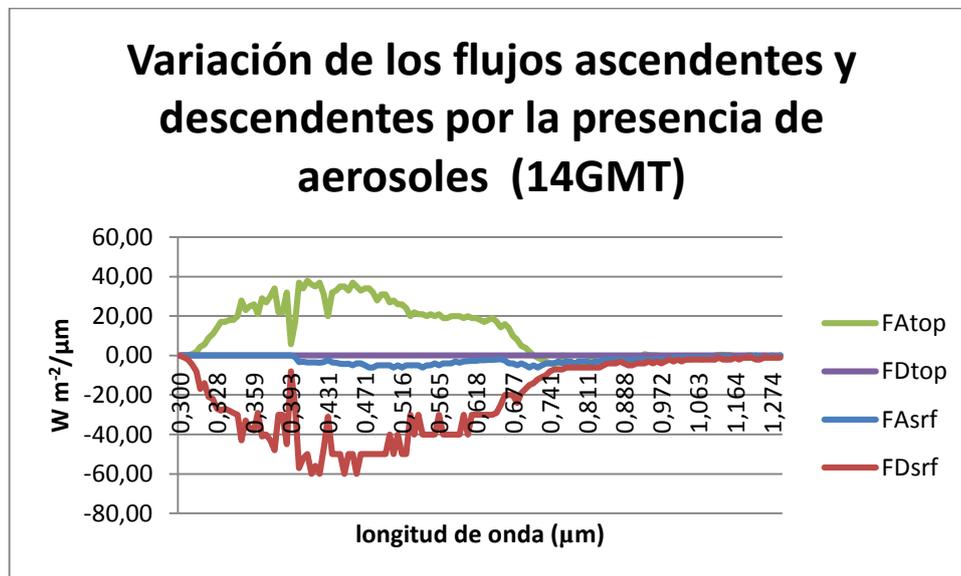
**e) Día 25 de septiembre (268)**

Se presentan en las Figura 44, Figura 45 y Figura 46 la variación de los flujos. En el FAtop el valor máximo en las 14 UTM fue de  $38 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  se dio en  $0,410 \mu\text{m}$ , a las 17 UTM fue  $26 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  en  $0,378 \mu\text{m}$  y las 20

UTM de  $29 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  en  $0,410 \mu\text{m}$ . La tendencia cambió obteniendo una variabilidad de valores negativos en la longitud de onda de  $0,719 \mu\text{m}$  con  $-1 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$ . En el caso del CENIT fue en la longitud de onda de  $0,690 \mu\text{m}$  con  $-1 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$ , y para las 20 UTM se dio a  $0,733 \mu\text{m}$  con el valor de  $-2 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$ . El  $\text{FD}_{\text{top}}$  no tuvo variabilidad. Los valores máximos obtenidos en la variabilidad de  $\text{FDSrf}$  fue de  $-60 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  a  $0,414 \mu\text{m}$  (14 UTM), a las 17 UTM fue de  $-40 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  en la longitud de onda de  $0,378 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$ , y a las 20 UTM los valores máximos obtenidos en la variabilidad de  $\text{FDSrf}$  fue de  $-50 \text{ Wm}^{-2}/\mu\text{m}$  a  $0,471$  y  $0,476 \mu\text{m}$ . El  $\text{FASrf}$  tiene poca variabilidad.

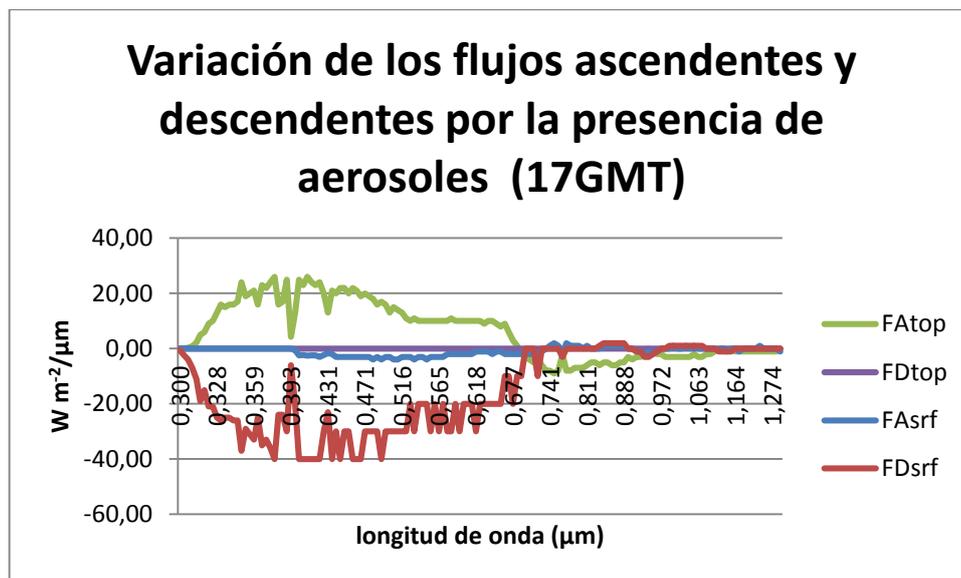
Los valores de EOA y Coeficiente de Angstrom en este día fueron  $0,128$  y  $1,784$  a las 14 UTM,  $0,106$  y  $1,811$  a las 17 UTM y  $0,095$  con  $1,762$  de Coeficiente de Angstrom para las 20 UTM. El mayor valor de EOA y Coeficiente de Angstrom corresponde al día en el que se registró mayor variabilidad tanto en el  $\text{FA}_{\text{top}}$  como en el  $\text{FDSrf}$ , tal como sucede en todos los casos de estudio anteriores.

**Figura 44.**  
**Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 25 de septiembre (14 UTM).**



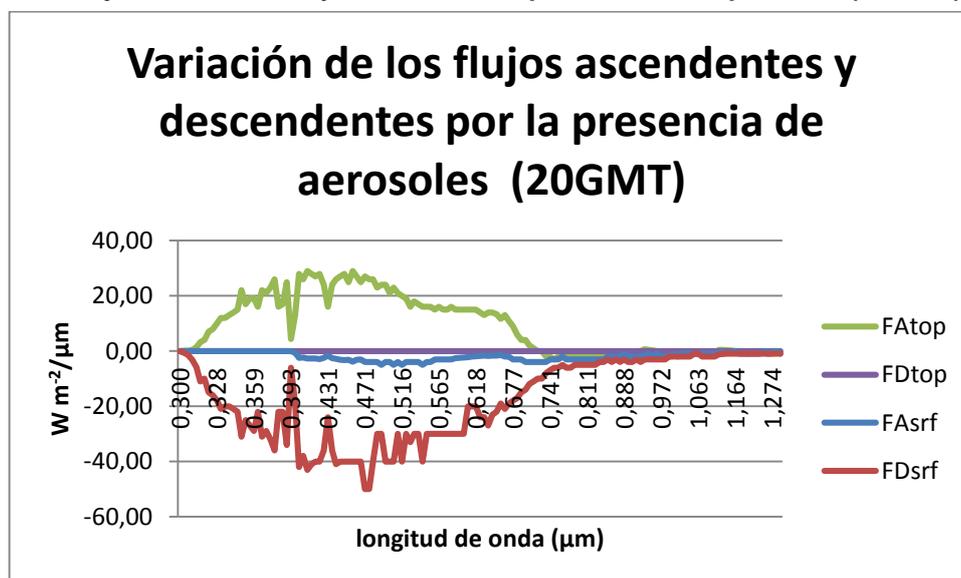
Fuente: Elaboración propia 2016.

Figura 45.  
Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 25 de septiembre (17 UTM).



Fuente: Elaboración propia 2016.

Figura 46.  
Variación de flujos ascendentes y descendentes para el 25 de septiembre (20 UTM).



Fuente: Elaboración propia 2016.

#### 4.1.3.2. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE OTRAS PROPIEDADES ÓPTICAS

Además del EOA y el Coeficiente de Angstrom, se ingresaron valores para otras propiedades ópticas de los aerosoles, es decir para el

Coeficiente de Extinción, el albedo de simple dispersión y el factor de asimetría. Los valores ingresados, como se explicó, son promedios del día, para diferentes longitudes de onda como se puede ver en la Tabla 4. Estos tienen una gran influencia de la variación de los flujos radiativos. A lo largo del análisis para cada día hemos podido notar que los valores máximos registrados para la variación de  $F_{A_{top}}$  y  $F_{D_{srf}}$  se encuentran alrededor de la longitud de onda de  $0,4 \mu\text{m}$ , esto va decreciendo a medida que la longitud de onda aumenta. Analizando primero el Coeficiente de Extinción (Tabla 4), se sabe que, a mayor valor de este, mayor extinción, es así que en el caso de la longitud de onda de  $0,440 \mu\text{m}$  ( $440 \text{ nm}$ ) el valor es alto y va decreciendo conforme la longitud de onda va aumentando, esto sucede en todos los casos de estudio. En el caso del albedo de simple dispersión se tiene la misma tendencia al igual que el factor de asimetría. Esto coincide con que a  $0,440 \mu\text{m}$  los valores de estas propiedades ópticas son mayores, y la variación de flujos ascendentes y descendentes también lo es. Esta variación disminuye en longitudes de onda más mayores, en las cuales los valores de las propiedades ópticas de aerosoles son menos significativos.

#### **a) ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS POR HORAS:**

En este punto se analizará el comportamiento y variación de los flujos por horas, es decir, a las 14 UTM en todos los días, a las 17 UTM y 20 UTM. De esta manera se podrá determinar en qué horario es que hay mayor influencia de los aerosoles. Para ello se empleará la Tabla 8.

**Tabla 8.**  
**Valores máximos de variación en los FAtop y FDsrf.**

Días		VALORES MÁXIMOS ( $Wm^{-2}/\mu m$ )		
		14 UTM	17 UTM	20 UTM
14	FAtop	18	25	
	FDsrf	-43	-40	
16	FAtop	19	12	21
	FDsrf	-67	-50	-70
17	FAtop	34	21	40
	FDsrf	-100	-70	-110
19	FAtop	66	38	38
	FDsrf	-120	-70	-70
25	FAtop	38	26	29
	FDsrf	-60	-40	-50

**Fuente: Elaboración propia 2016.**

En esta tabla se pueden apreciar los valores máximos respecto a la variación de los flujos, para esto se analizará el FAtop y FDsrf, ya que es donde hay mayor diferencia. Se puede observar que los valores menores son para el CENIT a lo largo de todos los días, debe tenerse en cuenta que es a esta hora en la que la radiación atraviesa la atmósfera formando un ángulo recto con el punto de referencia por lo que su viaje es más corto. Lo que no sucede en el caso de las 14 UTM y 20 UTM que es mayor la distancia, es decir del tope de la atmósfera a la superficie. Es por ello que la variabilidad a estas horas es mayor, sin embargo, se observa que a las 20 UTM dicha variación es aún mayor que a las 14 UTM.

#### **b) ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL FORZAMIENTO RADIATIVO INTEGRADO EN SUPERFICIE**

En el anexo N°3 se muestran los gráficos del forzamiento radiativo tanto en el TOP como en SRF para cada día y hora en las cuales se ha venido trabajando. En estos casos de estudio, el FRAsrf tiene similar tendencia

que el FDSrf, mostrado en los gráficos del punto 4.2.1. Sin embargo, ocurre todo lo contrario en el caso del FRA<sub>top</sub>, que adquiere una tendencia opuesta en comparación al F<sub>A</sub><sub>top</sub>. En base a los cálculos obtenidos, presentamos en la Tabla 9 los valores máximos de FRA para el TOP y SRF, los mínimos no se consideraron ya que es de 0.

**Tabla 9.**  
**Máximos y mínimos del FRA<sub>top</sub> y FRA<sub>srf</sub>.**

		14UTM	17UTM	20UTM
		MÁX	MÁX	MÁX
14	FRA <sub>top</sub>	-30	-30	
	FRA <sub>srf</sub>	-40	-40	
16	FRA <sub>top</sub>	-20	-11	-21
	FRA <sub>srf</sub>	-60	-40	-63
17	FRA <sub>top</sub>	-40	-20	-41
	FRA <sub>srf</sub>	-92	-60	-110
19	FRA <sub>top</sub>	-70	-40	-40
	FRA <sub>srf</sub>	-110	-70	-70
25	FRA <sub>top</sub>	-42	-30	-31
	FRA <sub>srf</sub>	-58	-40	-41

**Fuente: Elaboración propia 2016.**

En la Tabla 9 se observa un mayor forzamiento a las 20UTM, sin embargo, en el día 19 esto varía, siendo que el mayor FRA se calculó para las 14UTM, con  $-110\text{Wm}^2/\mu\text{m}$ . Este mismo valor se registró también el día 17 a las 20GMT. Los valores de FRA<sub>top</sub> y FRA<sub>srf</sub> son menores a

las 17UTM (CENIT), lo mismo que sucede con las variaciones de flujo ascendente y descendente.

Finalmente, la Tabla 10 muestra los valores de FRAsrf, siendo este el resultado de integrar el FRA en todas las longitudes de onda, desde 0,3 hasta 1,3  $\mu\text{m}$ , por el método de los trapecios. Es así que se observa que el mayor FRAsrf por aerosoles, generados por la quema de biomasa, ocurrió el día 19 de septiembre a las 14 UTM con  $-32,19 \text{ Wm}^{-2}$ , seguido del 17 de septiembre a horas 20 UTM con  $-29,01 \text{ Wm}^{-2}$ . El día en el que estos aerosoles tuvieron menor influencia en el FRAsrf fue el 14 de septiembre a las 17 UTM con una magnitud de  $-7,76 \text{ Wm}^{-2}$ .

**Tabla 10.**  
**Forzamiento radiativo integrando las longitudes de onda en superficie.**

Días	HORAS (UTM)		
	14	17	20
14	-10,25	-7,76	
16	-16,64	-10,93	-17,63
17	-25,52	-15,11	-29,01
19	-32,19	-17,39	-17,39
25	-14,5	-9,29	-11,11

Fuente: Elaboración propia 2016.

## 4.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS

### 4.2.1. INFLUENCIA DEL EOA EN EL FORZAMIENTO RADIATIVO

#### Hipótesis general

- **H<sub>i</sub>**: Existe una influencia de los aerosoles atmosféricos generados por la quema de biomasa, a través de su EOA, en el forzamiento radiativo terrestre.
- **H<sub>0</sub>**: No existe una influencia de los aerosoles atmosféricos generados por la quema de biomasa, a través de su EOA, en el forzamiento radiativo terrestre.

#### 4.2.1.1. Prueba de t para medias de dos muestras emparejadas para el día 257

Hipótesis:  $\alpha = 0,05$

$H_0: X1 = X2$

$H_i: X1 \neq X2$

**Tabla 11.**

**Análisis de la prueba t para dos muestras (Forzamiento radiativo en cielo claro y en atmósfera perturbada) para el día 257.**

	Media ( $\bar{x}$ )	G.L.	Valor crítico de t (dos colas)	Valor P (dos colas)	Estadístico t
Variable 1	668,12	294	1,96	9,26	17,58
Variable 2	655,22				

**Fuente: Elaboración propia 2016.**

$P > \text{Valor crítico de t}$

$\text{Estadístico} > \text{Valor crítico}$

$9,26 > 1,96$

$17,58 > 1,96$

Decisión: Se rechaza la hipótesis nula.

Interpretación: Existe influencia de los aerosoles atmosféricos generados por la quema de biomasa en el forzamiento radiativo terrestre.

#### 4.2.1.2. Prueba de t para medias de dos muestras emparejadas para el día 259

Hipótesis:  $\alpha = 0,05$

$H_0: X1 = X2$

$H_i: X1 \neq X2$

**Tabla 12.**

**Análisis de la prueba t para dos muestras (Forzamiento radiativo en cielo claro y en atmósfera perturbada) para el día 259.**

	Media ( $\bar{x}$ )	G.L.	Valor crítico de t (dos colas)	Valor P (dos colas)	Estadístico t
Variable 1	624,36	440	1,96	4,33	23,14
Variable 2	603,64				

**Fuente: Elaboración propia 2016.**

$P > \text{Valor crítico de } t$

$\text{Estadístico} > \text{Valor crítico}$

$4.33 > 1,96$

$23.14 > 1,96$

Decisión: Se rechaza la hipótesis nula

Interpretación: Existe influencia de los aerosoles atmosféricos generados por la quema de biomasa en el forzamiento radiativo terrestre.

#### **4.2.1.3. Prueba de t para medias de dos muestras emparejadas para el día 260**

Hipótesis:  $\alpha = 0,05$

$H_0: X1 = X2$

$H_i: X1 \neq X2$

**Tabla 13.**

**Análisis de la prueba t para dos muestras (Forzamiento radiativo en cielo claro y en atmósfera perturbada) para el día 260.**

	Media ( $\bar{x}$ )	G.L.	Valor crítico de t (dos colas)	Valor P (dos colas)	Estadístico t
Variable 1	626,23	440	1,96	1,98	22,39
Variable 2	594,3				

**Fuente: Elaboración propia 2016.**

$P > \text{Valor crítico de } t$                        $\text{Estadístico} > \text{Valor crítico}$

$1,98 > 1,96$

$22,39 > 1,96$

Decisión: Se rechaza la hipótesis nula

#### 4.2.1.4. Prueba de t para medias de dos muestras emparejadas para el día 262

Hipótesis:  $\alpha = 0,05$

$H_0: X_1 = X_2$

$H_i: X_1 \neq X_2$

**Tabla 14.**

**Análisis de la prueba t para dos muestras (Forzamiento radiativo en cielo claro y en atmósfera perturbada) para el día 262.**

	Media ( $\bar{x}$ )	G.L.	Valor crítico de t (dos colas)	Valor P (dos colas)	Estadístico t
Variable 1	721,59	440	1,96	6,36	21,56
Variable 2	690,51				

**Fuente: Elaboración propia 2016.**

$P > \text{Valor crítico de } t$                        $\text{Estadístico} > \text{Valor crítico}$

$6,36 > 1,96$

$21,56 > 1,96$

Decisión: Se rechaza la hipótesis nula

Interpretación: Existe influencia de los aerosoles atmosféricos generados por la quema de biomasa en el forzamiento radiativo terrestre.

#### 4.2.1.5. Prueba de t para medias de dos muestras emparejadas para el día 268

Hipótesis:  $\alpha = 0,05$

$H_0: X1 = X2$

$H_i: X1 \neq X2$

**Tabla 15.**

**Análisis de la prueba t para dos muestras (Forzamiento radiativo en cielo claro y en atmósfera perturbada) para el día 268.**

	Media ( $\bar{x}$ )	G.L.	Valor crítico de t (dos colas)	Valor P (dos colas)	Estadístico t
Variable 1	639,85	440	1,96	4,09	21,61
Variable 2	623,49				

**Fuente: Elaboración propia 2016.**

$P > \text{Valor crítico de t}$

$\text{Estadístico} > \text{Valor crítico}$

$4,09 > 1,96$

$21,61 > 1,96$

Decisión: Se rechaza la hipótesis nula

Interpretación: Existe influencia de los aerosoles atmosféricos generados por la quema de biomasa en el forzamiento radiativo terrestre.

#### 4.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS AEROSOLES ATMOSFÉRICOS EN HUANCAYO

**$H_i$ :** Se identifican los aerosoles generados por la quema de biomasa a través de su clasificación en base a sus propiedades ópticas y microfísicas.

**$H_0$ :** No se identifican los aerosoles generados por la quema de biomasa a través de su clasificación en base a sus propiedades ópticas y microfísicas.

Como fue presentado en el epígrafe 4.1.1. Clasificación de aerosoles atmosféricos en Huancayo; fue posible realizar dicha clasificación en base al EOA y el Coeficiente de Angstrom, que corresponde a las propiedades microfísicas y ópticas respectivamente.

La clasificación fue sustentada en las bases teóricas. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula.

#### 4.2.3. RELACIÓN ENTRE LOS DATOS DE AERONET Y MODIS

$H_i$ : Existe relación significativa entre los datos de AERONET y MODIS por lo que es posible seleccionar óptimos casos de estudio.

$H_0$ : No existe relación significativa entre los datos de AERONET y MODIS por lo que es no es posible seleccionar óptimos casos de estudio.

##### Análisis de correlación:

Hipótesis:  $\alpha = 0,05$

$H_0: \rho = 0$

$H_i: \rho \neq 0$

**Tabla 16.**

**Análisis de correlación de los datos de AERONET y MODIS.**

Coefficiente de correlación múltiple	$R^2$	$R^2$ ajustado	Valor P
0,2242	0,0503	0,0426	0,012

Fuente: Elaboración propia 2016.

##### Análisis de Varianza:

**Tabla 17.**

**Análisis de varianza de los datos de AERONET y MODIS.**

	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	0,0009	0,0009	6,5639	0,0116
Residuos	124	0,0169	0,0001		
Total	125	0,0178			

Fuente: Elaboración propia 2016.

$$P = 0,012 \neq 0$$

Decisión: Se rechaza la hipótesis nula.

Interpretación: Existe relación entre los datos de AERONET y MODIS, sin embargo, el valor del coeficiente de correlación es muy bajo y poco significativo.

#### **4.2.4. FORZAMIENTO RADIATIVO EN HUANCAYO**

$H_i$ : Con el modelo SBDART se determinó que si existe forzamiento radiativo en Huancayo.

$H_0$ : Con el modelo SBDART se determinó que no existe forzamiento radiativo en Huancayo.

Se utilizó el modelo SBDART, el cual arrojó datos de flujo ascendente y descendente, a partir de los cuales fue posible calcular el forzamiento radiativo terrestre mostrado en el epígrafe 4.1.3. Determinación del forzamiento radiativo terrestre en Huancayo, a través del modelo SBDART. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula.

### **4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Luego de haber recolectado, clasificado los aerosoles, relacionado los datos de AERONET y MODIS, calculado el forzamiento radiativo para finalmente evaluar la influencia del EOA sobre este, se obtuvieron resultados en cada etapa.

Estos resultados corroboran y dan soporte a algunos trabajos que forman parte de los antecedentes de esta tesis, en otros casos difiere. Para el tema del forzamiento radiativo, los resultados calculados son los primeros en Huancayo.

#### **4.3.1. INFLUENCIA DEL EOA EN EL FORZAMIENTO RADIATIVO**

A través de la prueba estadística t para medias de dos muestras emparejadas (siendo estas el EOA y el forzamiento radiativo) se rechazó la hipótesis nula, determinando así que evidentemente existe una influencia significativa de los aerosoles en el forzamiento radiativo en la ciudad de Huancayo. No existen antecedentes locales con los cuales se pueda discutir nuestros resultados, siendo estos los primeros.

Sin embargo, en otros países se han realizado diversos estudios sobre el forzamiento radiativo, analizando la influencia de aerosoles de diferentes tipos en este, ya sea aerosoles volcánicos, de quema de biomasa, entre otros. (Estevan Arredondo, 2009)

En este trabajo se utilizó el modelo SBDART para calcular el forzamiento radiativo que provocan los aerosoles generados por la quema de biomasa en el tope de la atmósfera y en la superficie, para los 5 casos de estudio, obteniendo el mayor valor el 19 de septiembre con una  $FRAsrf$  de  $-32,19 \text{ Wm}^{-2}$  a las 14 UTM, si se comparan estos valores con el forzamiento radiativo causado por aerosoles volcánicos o de otro origen van a variar notablemente puesto que no poseen las mismas propiedades ópticas, y además, los cálculos variarán de acuerdo a la metodología que se utilice para el cálculo del forzamiento radiativo. Tal es el caso si comparamos este valor con el obtenido por Estevan Arredondo (2009) de  $-4,02 \text{ Wm}^{-2}$ , que fue la mayor perturbación a 19 km de altura del mes de enero. Dicha perturbación fue provocada por aerosoles de fuentes volcánicas para el año 1992.

#### **4.3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS AEROSOLAS ATMOSFÉRICOS EN HUANCAYO**

Para la clasificación, como se ha explicado, esta tesis se basó en las propiedades ópticas y microfísicas de los aerosoles. A partir de esta clasificación, se pudo observar cierta variabilidad a lo largo del año en lo que al EOA se refiere. Sin embargo, los valores máximos, en la banda de 440 nm, se encuentran en los meses de agosto y septiembre con valores de 0,389 (agosto) y 1,449 para septiembre, mes que presenta la mayor media obtenida con 0,173 desde marzo hasta diciembre del 2015.

Esto en comparación con los resultados obtenidos por Vivanco (Vivanco Cristobal, 2014), tiene una ligera diferencia en la magnitud, no en el mes de ocurrencia. El EOA registrado fue de 0,51 (2005), valor derivado de MODIS a una longitud de onda de 550 nm, lo cual puede explicar dicha diferencia. Sin embargo, en ambos casos se coincide que los máximos valores de EOA fueron registrados en septiembre.

Si hablamos de los valores mínimos, estos fueron registrados en los meses de abril, mayo y junio, alcanzando valores de 0,019; 0,022 y 0,029, respectivamente, que en contraste con lo presentado por Vivanco (Vivanco Cristobal, 2014), tiene relación,

puesto que manifiesta que los mínimos fueron registrados en el mes de Junio (2012), con valores de 0,06 y 0,07.

En el estudio de investigación de Vivanco se plantea que la tendencia del EOA varía estacionalmente, señalando que el EOA aumenta en verano y primavera, mientras que en otoño e invierno disminuye. En esta tesis se analizó el número de focos, teniendo que el mes de septiembre fue el que registró mayor número de focos con 44724 en el área de estudio, esto en comparación con Suarez y colegas (Suarez, y otros, 2006) varía por diversos motivos, siendo el más resaltante que el valor registrado en ese estudio fue sobre la región amazónica, que abarca gran parte de Perú y mayor área amazónica de Brasil. En comparación con la presente investigación, por ello obtuvieron un promedio de 57308 focos de incendio, sin embargo, en ambos estudios el mes de septiembre es aquel que registra mayor cantidad de focos de incendio.

En dicho trabajo se hace referencia a que fue el mayor valor registrado en el año y que supera a los focos registrados en el Perú, haciendo visible la indiscutible influencia que tienen las quemadas de biomasa de países vecinos sobre el Perú. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en este trabajo, el cual ha sido evidenciado con el empleo de las retro trayectorias calculadas mediante el HYSPLIT, donde se observa claramente, sobre todo en los días 16, 17 y 25 de septiembre, como determinadas partículas provienen de Brasil.

#### **4.3.3. RELACIÓN ENTRE LOS DATOS DE AERONET Y MODIS**

Se realizó una correlación y análisis de varianzas para determinar la relación entre los datos de AERONET y MODIS, obteniendo un  $p = 0,01$  ( $p < 0,05$  y  $p \neq 0$ ), indicando la existencia de una correlación al ser el valor de  $p$  diferente de 0, sin embargo, el coeficiente de correlación fue de 0,22; un valor que nos indica que, si bien existe una correlación, esta no es significativa. Por su parte, Suazo, en su investigación (Suazo, 2013), reportó un coeficiente de correlación de MODIS (Aqua y Terra) con el fotómetro solar SP02L de 0,0284 y 0,0059 ( $p < 0,05$ ) indicando la baja correlación existente.

La correlación obtenida por Suazo es incluso menor a la obtenida en esta tesis, cabe resaltar que el tipo de fotómetro utilizado es diferente, ya que en esta investigación se utilizó el fotómetro solar CIMEL CE318 y Suazo el fotómetro solar SP02L.

## CONCLUSIONES

1. La influencia de los aerosoles generados por las quemadas de biomasa, a través de su EOA generan una influencia directa sobre el forzamiento terrestre, esto se ha visto evidenciado a lo largo de la tesis y su evaluación estadística. Además, los aerosoles que llegan a Huancayo e influyen en el forzamiento radiativo no son solo aquellos que se generan en la zona, sino que provienen de la Amazonía del Perú y países vecinos, destacando Brasil y Bolivia.
2. Se han clasificado los aerosoles en base a sus propiedades ópticas y microfísicas, seleccionando aquellos producidos por la quema de biomasa e identificando que los meses de agosto, setiembre y octubre son aquellos con mayor presencia de este tipo de aerosoles.
3. Existe una relación entre los datos de AERONET y MODIS, sin embargo, esta no es significativa. Se seleccionaron los estudios de casos para aquellas fechas cuyo valor de correlación fue más elevado. A partir del estudio de estos casos se corroboró, mediante corridas con el modelo HYSPLIT y focos de incendio obtenidos por ACRESP, la presencia de estos aerosoles por quemadas de biomasa.
4. Se calculó a través del modelo SBDART el forzamiento radiativo para los días seleccionados de setiembre, indicando que a mayor EOA mayor FRA. Se demostró también la gran influencia de otras propiedades ópticas tales como el Coeficiente de Angstrom, el Coeficiente de Extinción, el albedo de simple dispersión y el factor de asimetría. Indicando que cada propiedad de los aerosoles tiene una influencia directa en el forzamiento, además de otros factores como es el de la capa de la atmósfera que se está analizando, que en este caso es la tropósfera. El forzamiento que se obtuvo en la superficie fue negativo, contribuyendo así al enfriamiento en la superficie, lo que puede dar pie a muchos otros trabajos de investigación. Cabe resaltar que es la primera vez que se calcula el forzamiento radiativo en el Perú.

## RECOMENDACIONES

1. Al haberse realizado la instalación del fotómetro solar CIMEL CE-318T en la ciudad de Huancayo en marzo de 2015, el presente trabajo fue realizado con data de nivel 1.5, ya que como se ha explicado anteriormente, para utilizar el nivel 2 es necesaria la pos calibración del instrumento luego de ser retirado. Por lo que se recomienda realizar el reprocesamiento de los datos aquí empleados y reflejarlos en posteriores estudios mediante el empleo de los datos de nivel 2.
2. El forzamiento radiativo puede ser calculado empleando diferentes métodos y modelos, para este trabajo de utilizó el SBDART; como variables de entrada se utilizaron las que suministradas por los datos de AERONET, en tal sentido, se recomienda que para futuras investigaciones se considere además la dispersión y absorción obtenidos a partir de mediciones, es decir, a través de sus instrumentos respectivos, mencionados en uno de los capítulos de este trabajo.
3. Se recomienda tomar en cuenta los datos y la metodología utilizada para investigaciones futuras.
4. En la actualidad no se cuenta con toda la instrumentación necesaria para realizar trabajos de investigación atmosférica a mayor escala, por lo que, de ser posible, se recomienda buscar la implementación de estos y así facilitar y promover, la investigación atmosférica de gran nivel.
5. El avance que se ha realizado a nivel de investigación atmosférica a través de la presente tesis, es importante, considerando que se han obtenido resultados a variables antes no estudiadas, como es el caso del forzamiento radiativo. Por lo que es necesario continuar con proyectos en ciencias atmosféricas y considerar las consecuencias de la presencia de los aerosoles en el forzamiento radiativo, en la salud, en el sector agrícola y en otros de vital importancia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEGRÍA CAMPO, Dairo Libardo. 2015.** Propiedades microfísicas de los aerosoles troposféricos derivadas de medidas de fotómetro solar y Lidar en el Valle de Aburrá. Medellín : Universidad Nacional de Colombia, 2015.
- ALISSON, Elton. 2014.** Agencia FAPESP. [En línea] 21 de Agosto de 2014. [http://agencia.fapesp.br/la\\_deforestacion\\_de\\_la\\_amazonia\\_incrementa\\_la\\_contaminacion\\_en\\_paises\\_de\\_america\\_del\\_sur/19639/](http://agencia.fapesp.br/la_deforestacion_de_la_amazonia_incrementa_la_contaminacion_en_paises_de_america_del_sur/19639/).
- CADLE, Richard D. 1976.** Particles in the atmosphere an space. New York : Reinhold, 1976.
- CORTÉS HERNÁNDEZ, Virginia Edith. 2014.** Caracterización de aerosoles por quema de biomasa en el sureste de México. México : Tecnologías y ciencias del agua, 2014. Vol. 5, 1.
- CRUTZEN, P. y LELIEVELD, J. 1997.** Human impacts on atmospheric aerosols: biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. s.l. : Science, 1997.
- DENG, Xuejiao, XUEXI, Tie y XIUJI, Zhou. 2008.** Effects of Southeast Asia Biomass burning on aerosols and ozone concentrations over the Pearl River Delta (PRD) region. s.l. : ELSEVIER, 2008. Vol. 42.
- DIAS MARTIN, Juan Carlos. 1994.** Aportación al análisis de espectros de radiación, estructuras y algoritmos. Madrid : s.n., 1994.
- DÍAZ RODRIGUEZ, Ana María. 2006.** *Caracterización de los aerosoles atmosféricos y su influencia en los niveles de radiación UV en la región de Canarias.* Canarias : s.n., 2006.
- DRAXLER, R. R. y HESS, G. D. 1998.** An Overview of the HYSPLIT\_4 Modeling System for Trajectories, Dispersion, and Deposition. Australia : Australian Meteorological Magazine, 1998. Vol. 47.
- DRAXLER, R. R. y ROLPH, G. D. 2015.** HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model Access. *NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.* [En línea] 2015. [Citado el: 15 de Junio de 2015.] <http://ready.ar.noaa.gov/HYSPLIT.php>.
- DRAXLER, Roland R. 1999.** HYSPLIT\_4 USER'S GUIDE. Maryland : NOAA Technical Memorandum ERL ARL-230, 1999.
- DUBOVIK, Oleg y D. KING, Michael. 2000.** A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. s.l. : Journal of Geophysical Research, 2000. Vol. 105, D16.
- DUBOVIK, Oleg, y otros. 2002.** Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations. s.l. : Journal of the Atmospheric Sciences, 2002. Vol. 59.
- ESTEVAN ARREDONDO, René. 2009.** *Efecto radiativo de la nube de aerosoles del Monte Pinatubo sobre el Gran Caribe.* La Habana : s.n., 2009.

- FERNANDEZ , R., y otros. 2010.** Modelo Regional de la calidad de aire utilizando el modelo WRF/CHEM: Implementación de datos globales y locales para Mendoza. Mendoza : Universidad Tecnológica Mendoza, 2010.
- GALLEGO PICO, Alejandrina, y otros. 2012.** *Contaminación Atmosférica*. Madrid : Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2012.
- GONZALES, Manuel Augusto . 2013.** *Validación de productos MODIS nivel 3 (aerosoles) sobre la costa mediterranea septentrional*. Valencia : s.n., 2013.
- GONZÁLEZ ARIAS, Arnaldo. 2001.** *El Magnetismo*. s.l. : Salamanca, 2001. 77.
- GRELL, G., y otros. 2005.** Fully coupled online chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*. [En línea] 2005. [Citado el: 26 de 05 de 2016.] <http://ruc.noaa.gov/wrf/WG11/>.
- HÉRNANDES, R., FERNANDES, C. y BAPTISTA, P. 2007.** *Metodología de la Investigación*. 2007.
- HESS, M., KOEPKE, P. y SCHULT, I. 1998.** Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC. Munchen, Germany : Bulletin of the American Metreological Society, 1998.
- HOLBEN, B.N., TANRÉ, D. y SMIRNOV, A.** An emerging ground-based aerosol climatology Aerosol Optical Depth from AERONET.
- IPCC. 2008.** *Cambio climático 2007 - Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza : s.n., 2008.
- JESUS SANTAMARÍA, Antonio. 2010.** Forzamiento Radiativo y Cambios Químicos en la atmósfera. Madrid : Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Valverde 22, 2010. Vol. 104, 1.
- MITMA, Daniel. 2015.** Contaminación en Huancayo supera los niveles permitidos por el Estandar de Calidad Ambiental. 2015.
- MOYA ÁLVAREZ, Aldo, ESTEVAN ARREDONDO, René y POSADAS R., Yuli. 2016.** Determinación de la presencia de partículas PM10 en Perú producidas por quema de biomasa con ayuda de modelos numéricos. Huancayo : Apuntes de Ciencia y Sociedad, 2016.
- NASA. 2015.** AERONET. [En línea] 2015. [http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new\\_web/maritime\\_aerosol\\_network.html](http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/maritime_aerosol_network.html).
- NOAA. 2015.** ARL Air Resources Laboratory Advancing Atmospheric Science and Technology through Research. [En línea] NOAA, 26 de Marzo de 2015. [Citado el: 05 de Junio de 2015.] [www.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_info.php](http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_info.php).
- OMS. 2015.** Calidad del aire ambiental exterior y salud. [En línea] 2015. [Citado el: 28 de Enero de 2015.] <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>.
- O'NEILL, N. T., y otros. 2003.** Spectral discrimination of coarse and fine mode optical depth. s.l. : Journal of Geophysical Research, 2003. Vol. 108, D17, 4559.

- PECKMAN, S., y otros. 2010.** WRF/CHEM Version 3.2 Users Guide. *National Center for Atmospheric REsearch (NCAR), USA*. [En línea] 2010. [Citado el: 27 de 05 de 2016.] [http://ruc.noaa.gov/wrf/WG11/Users\\_guide.pdf](http://ruc.noaa.gov/wrf/WG11/Users_guide.pdf).
- RICCHIAZZI, Paul. 2002.** Input documentation for SBDART. Sanata Barbara : Institute for Computational Earth System Science, 2002.
- RICHIAZZI, Paul, y otros. 1998.** SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plane-Parallel Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere. Santa Barbara : s.n., 1998. Vol. 79, 10, págs. 2101-2114.
- ROLPH, G. D. 2015.** Real Time Enviromental Aplications and Display System. *Air Resources Laboratory, Silver Sprung MD*. [En línea] 2015. [Citado el: 15 de Junio de 2015.] <http://ready.arl.noaa.gov>.
- SAAVEDRA HUANCA, Miguel, TAKAHASHI, Ken y TRASMONTE, Grace. 2009.** *Caracterización Física de Haldas Radiativas en el Valle del Mantaro*. Lima : s.n., 2009.
- SOBRINO, José A. 2001.** *Teledetección*. Valencia : AEI, 2001.
- STENCHIKOV, Gerogiy L., y otros. 1998.** Radiative forcing from the 1991 Mount Pinatubo volcanic eruption. 1998. Vol. 103, D12.
- SUAREZ , Luis, y otros. 2006.** Estudio de la variación estacional de ozono troposférico y aerosoles del Parú relacionado a las quemas de vegetación en la Amazonía. Huancayo : Mosaico Cient., 2006. Vol. 3, 2.
- SUAZO, Julio Ángeles. 2013.** Determiación del espesor óptico de aerosol en la Estación Antártica Peruana Machu Picchu. Huancayo : Apuntes de Ciencia y Sociedad, 2013. Vol. 03, 01.
- TOLEDANO OLMEDA, Carlos. 2005.** *Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación El Arenosillo de la red AERONET*. Valladolid : s.n., 2005.
- TORRES RAMÍREZ, Ninoshka. 2013.** *Determinación del coeficiente de turbiedad atmosférica en todo el ancho de banda del espectro solar para la localidad de Chapinero, Bogotá, Colombia*. Bogotá : s.n., 2013.
- UCAR. 2015.** ACRESP. [En línea] 2015. [Citado el: 20 de febrero de 2015.] <https://www2.acom.ucar.edu/acresp>.
- VELEZ, Alexa. 2016.** Mongabay.org. [En línea] 2016. <https://es.mongabay.com/2016/08/brasil-bolivia-peru-los-efectos-las-sequias-e-incendios-forestales-podrian-los-mas-severos-los-ultimos-diez-anos/>.
- VIVANCO CRISTOBAL, Sthefany Virginia. 2014.** Variabilidad temporal de aerosoles atmosféricos en Huancayo. Huancayo : Apuntes de ciencia y sociedad, 2014. Vol. 4, 1.
- VIVANCO MORENO, Sonia Fabiola y RAMIREZ LARA, Evangelista. 2007.** Aplicación del modelo HYSPLIT para evaluar las trayectorias del aire y su impacto en la dispersión de contaminantes atmosféricos. México : s.n., 2007.
- WAGNER, F. y SILVA, A.M. 2008.** Some considerations about Angstrom exponent distributions. s.l. : Atmospheric Chemistry Physics, 2008. Vol. 8.

## **ANEXOS**

**Anexo 1: Especificaciones de las bandas espectrales del Espectroradiómetro MODIS  
(Fuente: modis.gsfc.nasa.gov).**

<b>Uso primario</b>	<b>Banda</b>	<b>Longitud de onda (nm)</b>	<b>Radiancia Espectral (W/m<sup>2</sup> - μm-sr)</b>	<b>Resolución (m)</b>
Tierra/nubes/límites de aerosol	1	620 – 670	21.8	250
	2	841 – 876	24.7	250
Tierra/nubes/propiedades de aerosol	3	459 – 479	35.3	500
	4	545 – 565	29.0	500
	5	1230 – 1250	5.4	500
	6	1628 – 1652	7.3	500
	7	2105 – 2155	1.0	500
Color de océano/fitoplancton/biogeoquímica	8	405 - 420	44.9	1000
	9	438 – 448	41.9	1000
	10	483 – 493	32.1	1000
	11	526 – 536	27.9	1000
	12	546 – 556	21.0	1000
	13	662 – 672	9.5	1000
	14	673 – 683	8.7	1000
	15	743 – 753	10.2	1000
Vapor de agua atmosférico	16	862 – 877	6.2	1000
	17	890 – 920	10.0	1000
	18	931 – 941	3.6	1000
Superficie/temperatura de las nubes	19	915 - 965	15.0	1000
	20	366 – 384	0.45 (300K)	1000
	21	392.9 – 398.9	2.38 (335K)	1000
	22	392.9 – 398.9	0.67 (300K)	1000
Temperatura atmosférica	23	402.0 – 408.0	0.79 (300K)	1000
	24	443.3 – 449.8	0.17 (250K)	1000
	25	448.2 – 454.9	0.59 (275K)	1000

Nubes Cirrus	26	136 – 139	6.00	1000
Vapor de Agua	27	653.5 – 689.5	1.16 (240K)	1000
	28	717.5 – 747.5	2.18 (250K)	1000
Propiedades de las nubes	29	840 – 870	9.58 (300K)	1000
Ozono	30	958 – 988	3.69 (250K)	1000
Superficie/ temperatura de nube	31	1078 – 1128	9.55 (300K)	1000
	32	1177 – 1227	8.94 (300K)	1000
Altitud tope de la nube	33	1318.5 – 1348.5	4.52 (260K)	1000
	34	1348.5 – 1378.5	3.76 (250K)	1000
	35	1378.5 – 1408.5	3.11 (240K)	1000
	36	1408.5 – 1438.5	2.08 (220K)	1000

**Anexo 2: Script desarrollado en formato bash (Linux), para la creación del fichero de entrada (INPUT) y para la ejecución del modelo.**

```
for iaer in 0 3 ;do
  echo iaer=$iaer

  str1="
  &INPUT\n
  isat=0,\n
  wlinf=0.3,\n
  wlsup=1.3,\n
  wlinc=-0.01,\n\n
  idatm=6,\n
  nf=3,\n\n
  iday=257,\n
  time=17,\n
  alat=-12.0402,\n
  alon=-75.3209,\n\n
  isalb=6,\n\n
  uw=1.418,\n
  uo3=0.349,\n
  xco2=360,\n\n"

  if [ $iaer -eq 0 ] ; then
    str2="
    iaer= $iaer,\n
    vis=20.,\n"
  else
    str2="
    iaer=5,\n
    tbaer=0.10294,\n
    abaer=1.87849,\n
    wlbaer=.440,.675,.870,1.018,\n
    qbaer=0.14880,0.07920,0.05580,0.04650,\n
    wbaer=0.97420,0.96630,0.96180,0.96040,\n
    gbaer=0.64632,0.61043,0.61247,0.62017,\n\n"
  fi

  str3="
  zout=0,100,\n
  iout=1,\n
  nstr=4,\n"

  str_final="$str1 $str2 $str3"
  echo -e $str_final > INPUT
  outfile=EXO_{$iaer}.out
  rm -f $outfile
  ./sbdart >> $outfile
done
```

### Anexo 3: Forzamiento radiativo en el tope de la atmósfera y superficie.

Figura 47.  
FRA día 14 de septiembre.

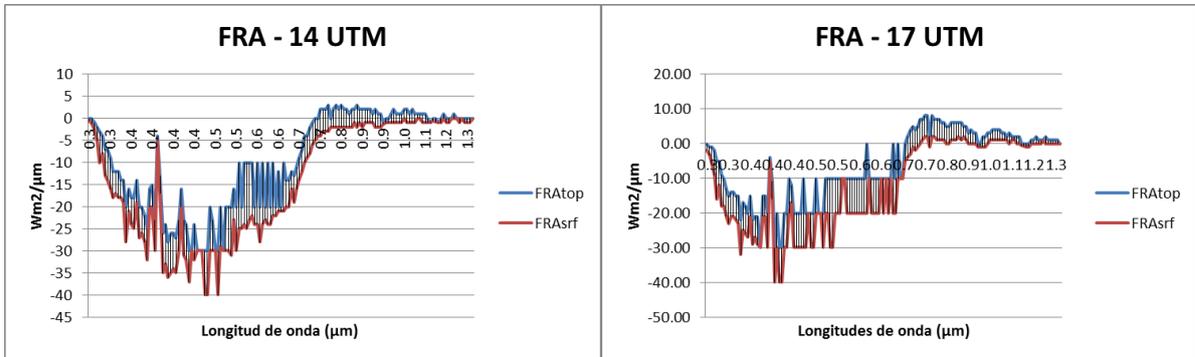
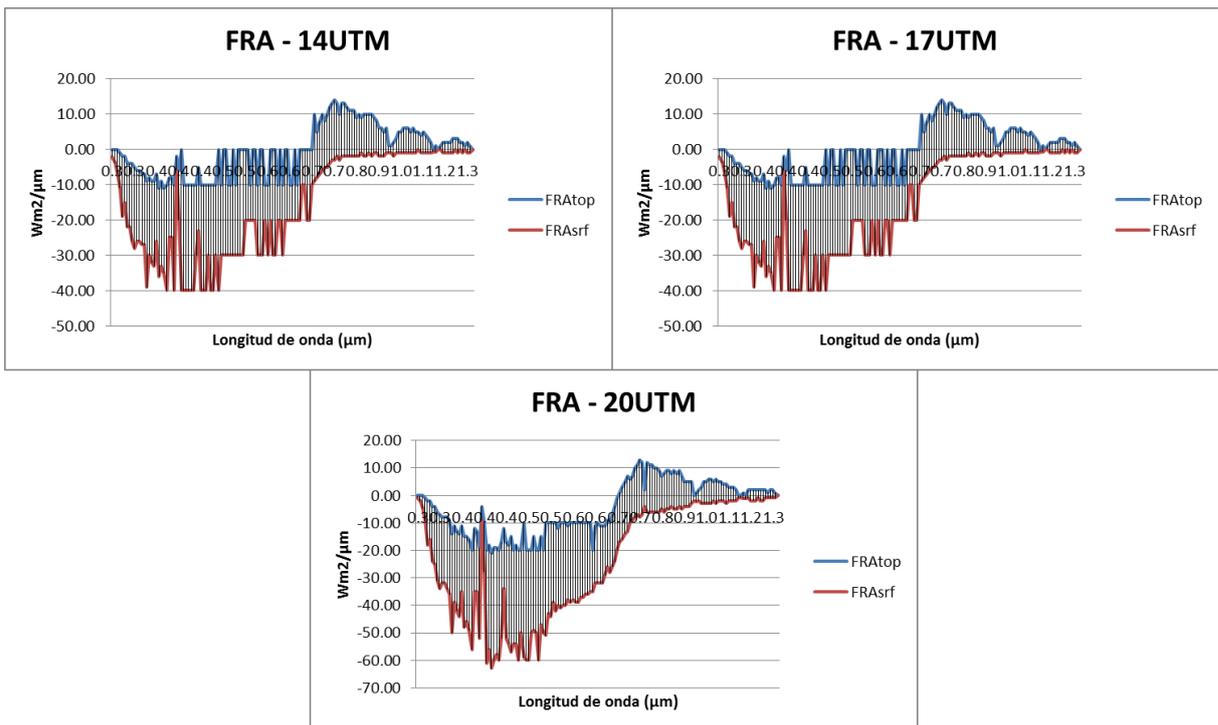
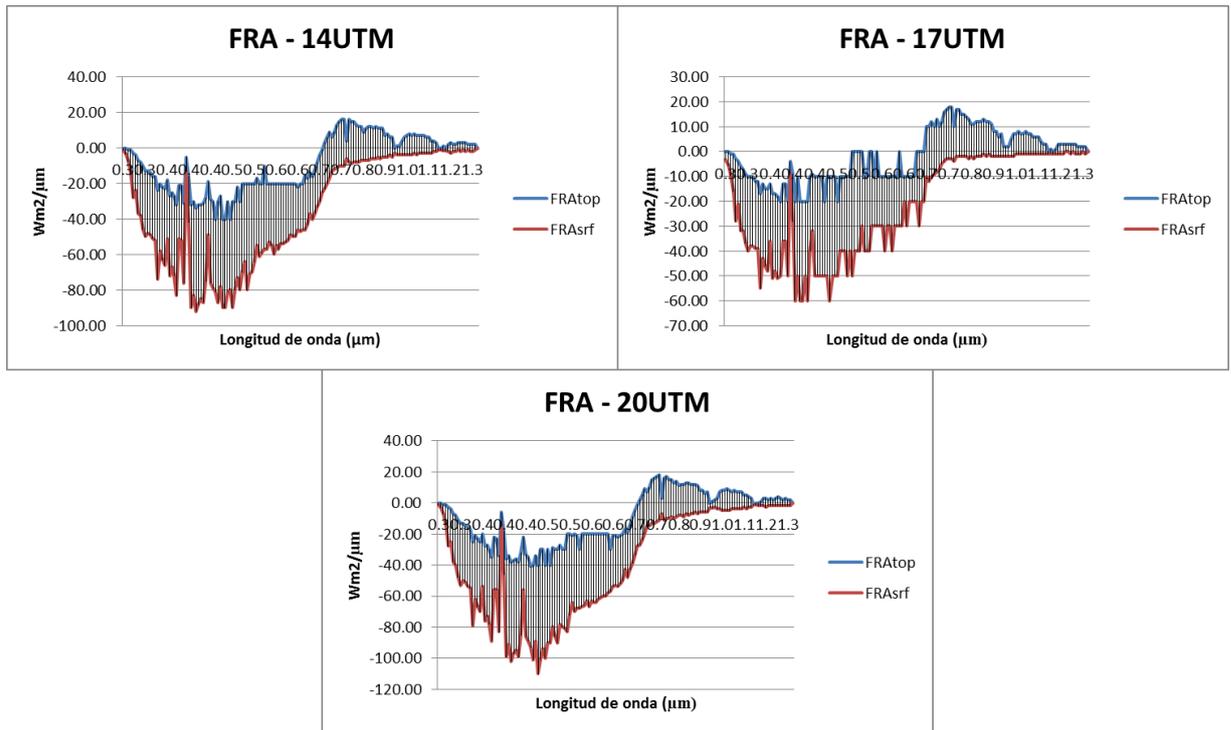


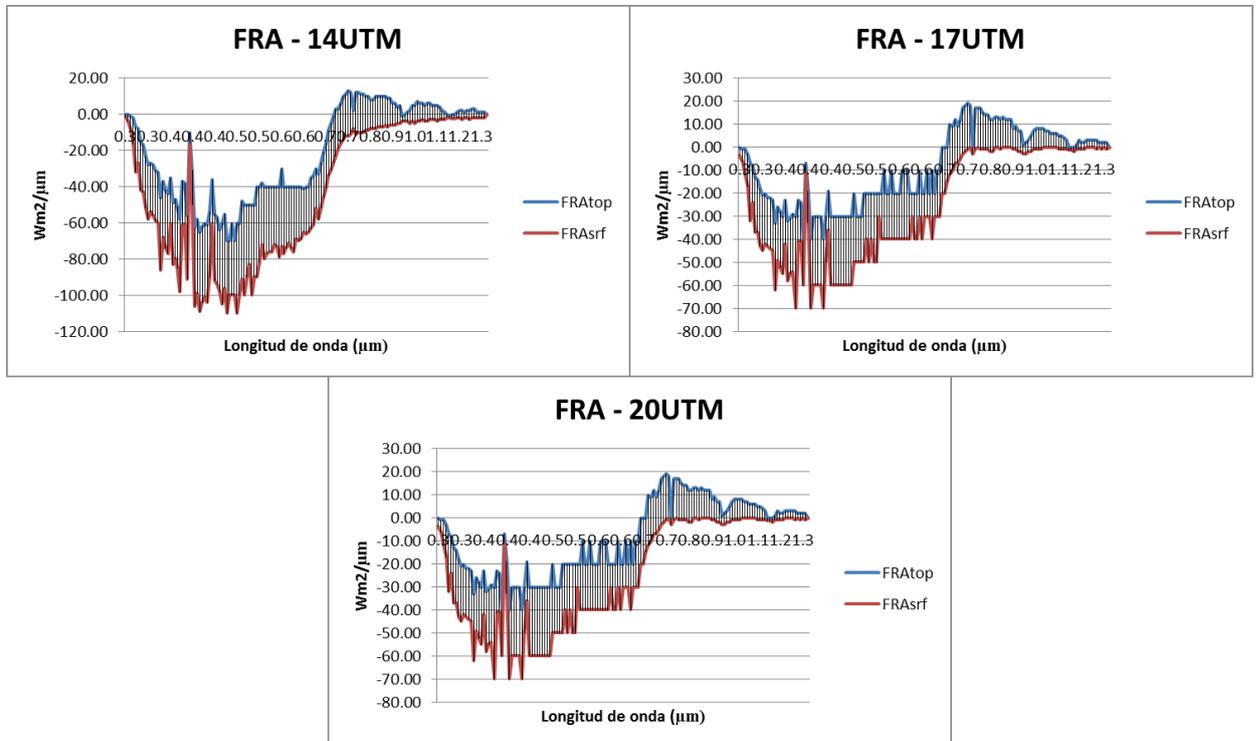
Figura 48.  
FRA día 16 de septiembre.



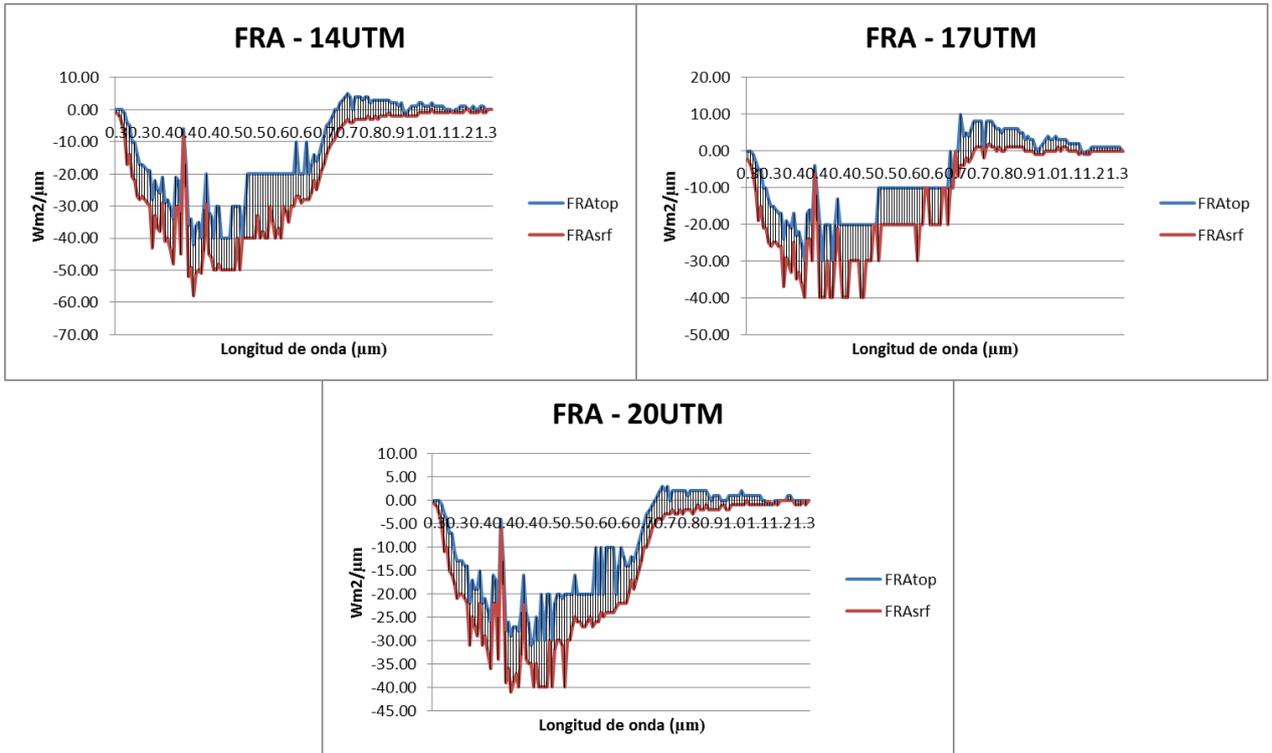
**Figura 49.**  
**FRA día 17 de septiembre**



**Figura 50.**  
**FRA día 19 de septiembre.**



**Figura 51.**  
**FRA día 25 de septiembre.**



## Anexo 4: Artículo científico realizado por JESUS SANTAMARÍA

*Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat. (Esp)*  
*Vol. 104, Nº. 1, pp 149-173, 2010*  
*XI Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica*

### FORZAMIENTO RADIATIVO Y CAMBIOS QUÍMICOS EN LA ATMÓSFERA

JESÚS SANTAMARÍA ANTONIO\*

\* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Valverde 22, 28004 Madrid. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Complutense. 28040 Madrid. E-mail: jsanta@quim.ucm.es

#### RESUMEN

El rápido aumento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, ozono, etc.) causado por la actividad humana, provoca una alteración del flujo de energía radiante en la Atmósfera (*forzamiento radiativo directo*) debido a la absorción de radiación infrarroja terrestre por las moléculas constitutivas de esos gases, y consecuentemente altera significativamente el balance de energía en la superficie de la Tierra (*forzamiento climático*). Existen otros *agentes de forzamiento*, como el vapor de agua y los *gases contaminantes* (VOC, NO<sub>x</sub>, etc.) y *partículas de aerosoles* (carbonilla, polvo, ceniza, etc.) que modifican también de forma directa o indirecta el flujo radiativo en la Atmósfera.

La complejidad de la *respuesta* del sistema climático radica en que el incremento de temperatura no es el único efecto del forzamiento climático, sino que se modifican otras variables, como el flujo de evapotranspiración (variación del vapor de agua), formación de nubes, el albedo de la superficie (nieve, hielo, suelo), el gradiente térmico atmosférico, etc. Estas variables originan *mecanismos de retroalimentación*, es decir procesos climáticos internos en respuesta a una perturbación externa, que amplifican o disminuyen la respuesta climática térmica a un forzamiento inicial. Estos procesos pueden ser dependientes entre sí, tienen tiempos de vida distintos y en algunos casos, como en el efecto de las nubes, son una fuente

de incertidumbre en la predicción del clima, debido a la ambivalencia del signo de la retroalimentación a lo largo del proceso. La consecuencia es un progreso muy lento en la modelización y predicción del clima.

En esta comunicación pondremos énfasis en las causas fisicoquímicas generales del *calentamiento global* y *cambio climático*, más que en la evaluación concreta y análisis del estado actual, consecuencias específicas locales y proyecciones futuras, dado que éstas vienen descritas en detalle en el *Report del Grupo I de trabajo: Bases en la Ciencia Física* del Panel Intergubernamental sobre el cambio Climático (*Report IPCC 2007*).

#### 1. CONCEPTOS GENERALES Y NIVEL DE COMPRENSIÓN (1, 2, 3, 4, 5)

##### Conceptos y estado de la cuestión

El clima es la respuesta de la superficie terrestre (atmósfera, océanos, continentes) al estímulo que representa fundamentalmente la radiación solar, prescindiendo de otras causas menores como el vulcanismo y la energía geotérmica. La Tierra absorbe la mayor parte de esta radiación cerca del ecuador y la redistribuye mediante una serie de procesos, en los que la circulación atmosférica, las reacciones químicas, las corrientes oceánicas, las masas continentales y las nubes, interaccionan de un modo complejo. El resulta-

## Anexo 5: Artículo científico presentado por SUAZO

### Determinación del espesor óptico de aerosol en la Estación Antártica Peruana Machu Picchu

### Determination of aerosol optical depth in the Machu Picchu Peruvian Antarctic Station

Julio Ángeles Suazo  
Universidad Alas Peruanas

#### RESUMEN

**Objetivos:** Determinar el espesor óptico de los aerosoles (EOA) durante los meses de enero 2007 y 2008 y febrero de 2013 en la Estación Científica Antártica Machu Picchu (ECAMP). **Métodos:** La investigación fue descriptiva comparativa. El principal instrumento para evaluar el EOA fue el fotómetro solar SP02-L para mediciones directas del sol con 4 sensores centrados en las longitudes de onda 412, 500, 675 y 862 nm. Solo fueron utilizados registros con un ángulo cenital solar inferior a 80° y con cero de cobertura nubosa 30° alrededor del Sol. Estas mediciones fueron comparadas, a través de la prueba de Pearson, con EOA a 550 nm de los sensores satelitales MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). **Resultados:** Se determinó una máxima y mínima media de EOA de 0,1061 y 0,0616, respectivamente. Se reportó un coeficiente de correlación con el sensor MODIS, tanto del satélite Aqua y Terra, siendo 0,0284 y 0,0059 ( $p < 0,05$ ), respectivamente. La misma correlación fue evaluada con el Índice de Aerosol del sensor OMI (Ozone Monitoring Instrument) resultando una mayor correlación, 0,3606 ( $p < 0,05$ ). Comparando el EOA resultante en la ECAMP con las demás estaciones antárticas se encontraron valores similares alrededor de 0,06, especialmente cercanas a zonas costeras como Neumayer y Aboa. **Conclusiones:** Los datos obtenidos en la ECAMP en los años 2007, 2008 y 2013 no evidencian una variación significativa respecto al espesor óptico de aerosoles. Los altos valores obtenidos en la ECAMP comparados con



Julio Ángeles

julio\_as\_1@hotmail.com

las estaciones de Aboa y Neumayer pueden tener su explicación en las mediciones manuales realizadas en comparación con las automáticas de las otras estaciones.

**Palabras clave:** Espesor óptico de aerosol, Estación Científica Antártica Machu Picchu, fotómetro solar.

## Estudio de la variación estacional de ozono troposférico y aerosoles del Perú relacionado a las quemas de vegetación en la Amazonía

Study of the seasonal variation of tropospheric ozone and aerosols related to the biomass burning in Amazonia

Luis Suárez<sup>1,3</sup>,  
Luis Castillo<sup>2</sup>,  
Madeleyne Marín<sup>2</sup>,  
Gisela Carrillo<sup>2</sup>,  
Lody Rímac<sup>2</sup>,  
José Pomalaya<sup>2</sup>,  
Ricardo Menacho<sup>2</sup>

### RESUMEN

La quema de vegetación es la más importante fuente de contaminación del aire en la región tropical del planeta. De manera especial, en la Amazonia esta contaminación alcanza miles de kilómetros, principalmente los relacionados a las quemas en territorio de Brasil, que serían transportados por los vientos hasta el territorio peruano. Este estudio presenta las evidencias del transporte transfronterizo de contaminantes del aire hacia el Perú desde Brasil, y utiliza datos de satélite para poder cuantificarlo y evaluar el rol que tiene este transporte en la composición química de la atmósfera de la región peruana. Se han evaluado datos de los satélites TOMS y MODIS para evaluar y cuantificar la variación estacional de contaminantes del aire: ozono troposférico y aerosoles (material particulado). Esto ha permitido evaluar la variación estacional en términos de ozono troposférico, Índice de Aerosol (AI) y espesor óptico de aerosol (AOD), tomando como referencia la ciudad de Huancayo, en la cordillera de los Andes, que indicaría el transporte de los contaminantes al territorio peruano. Los datos han mostrado máximos valores durante la última parte del periodo seco (agosto a noviembre). Este incremento no encontraría explicación solamente en las quemas locales, sino que además tendría la influencia del transporte de contaminantes del lado de la región de Brasil.

**Palabras clave:** ozono troposférico, aerosoles, quema de vegetación, contaminación del aire fronterizo.

### ABSTRACT

Biomass burning is the most important source of air pollution in the tropical region of the world. Specially, in the Amazon basin the pollution reaches thousand of kilometers, mainly, the related to burning in the region of Brasil, that could be transported by the predominant winds to the peruvian territory. This study presents evidences of the of the transboundary air pollution from Brasil to Peru and utilizes data from TOMS and MODIS satellites to evaluate and quantify air pollutants: tropospheric ozone and aerosols (particulate matter). This permitted to evaluate the seasonal variation in terms of tropospheric ozone, aerosol index (AI) and aerosol optical depth (AOD) taking as reference Huancayo city, over the Andean mountain, that could indicate the transport of the pollutants to the peruvian territory. The data showed maximum values during the late part of the dry season (August to November). This increase could not be explained only by the local biomass burnings, but it has additional influence of the transport of pollutants coming from Brasil.

**Key words:** tropospheric ozone, aerosols, biomass burning, transboundary air pollution.

## Anexo 7: Artículo científico presentado por VIVANCO CRISTOBAL

# Variabilidad temporal de aerosoles atmosféricos en Huancayo

## Temporal variability of atmospheric aerosols in Huancayo

Sthefany Virginia Vivanco Cristobal  
Universidad Continental

### RESUMEN

**Objetivos:** Identificar la variabilidad temporal de los aerosoles atmosféricos en Huancayo a través de datos satelitales. **Métodos:** Investigación de alcance descriptivo, diseño longitudinal. Los datos utilizados fueron, el índice de aerosol (IA) tomados por el sensor OMI (ozone monitoring instrument) en el período 2005-2012; y el espesor óptico de aerosol (EOA) registrados por el sensor MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) de las plataformas Aqua y Terra, en los períodos 2003-2012 y 2001-2012, respectivamente. **Resultados:** El IA registró el año 2012 un máximo interanual de 0,61; durante el período enero-marzo disminuyó a 0,30; abril-agosto aumentó a 0,75 y setiembre-diciembre disminuyó a 0,43. En cambio, el EOA reportó en el 2005 un máximo interanual de 0,22; en el período abril-junio disminuyó a 0,09; julio-setiembre aumentó a 0,30; octubre-diciembre disminuyó a 0,22, y enero-marzo aumentó a 0,20. El análisis estadístico reportó un coeficiente de correlación entre el IA del sensor OMI y el EOA del sensor MODIS de las plataformas Aqua y Terra, siendo 0,1041 y 0,0982 ( $p < 0,05$ ), respectivamente. La misma correlación fue efectuada entre los datos del sensor MODIS, resultando más elevada 0,902 ( $p < 0,05$ ). El IA mostró una tendencia de incremento a razón de 0,036/año; el EOA de disminución, 0,003/año. **Conclusiones:** Se identificó un patrón de variación significativo entre las estaciones y los meses de ambos parámetros con elevados valores del IA en invierno y otoño, máximos en agosto; el EOA, en primavera y verano, máximos en septiembre.



Sthefany Vivanco

U2009114799@continental.edu.pe

#### Historial del artículo:

Recibido: 3 de abril de 2014

Aprobado: 29 de mayo de 2014

Disponible en línea: 30 de junio de 2014

**Palabras clave:** Variabilidad temporal, aerosoles atmosféricos, índice de aerosol, espesor óptico de aerosol.

<sup>1</sup> Bachiller en Ingeniería Ambiental de la Universidad Continental.

**Anexo 8: Tesis de investigación presentada por TORRES RAMIREZ**

**Determinación del coeficiente de turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) en todo el ancho de banda del espectro solar para la localidad de Chapinero, Bogotá, Colombia.**

**Ninoshka Torres Ramírez**

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

**Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente.**

Asesor:

**Esp. Ph.D.Jhon Fredy Betancur P.**

Co-Asesor:

**Esp. Ing. Ovidio Simbaqueva Fonseca**

Universidad de Manizales

Facultad de Ingenierías

Bogotá, D.C., Colombia

2013

## 7. CONCLUSIONES

- La turbidez atmosférica en la localidad de Chapinero superó estadísticamente la registrada en Nemocón en los años 2011 y 2012.
- La calidad de la atmósfera, para los años 2011 y 2012, en la localidad de Chapinero correspondió a atmósfera turbia según la clasificación Ångström, esto debido a la contaminación atmosférica generada por el sistema de transporte de combustión.
- Durante 2011 en ambas localidades los meses de menor turbiedad atmosférica fueron los comprendidos dentro del trimestre julio-septiembre. Mientras que los meses de mayor turbiedad atmosférica en Chapinero corresponden a junio, octubre y diciembre, y en Nemocón estos meses son enero, abril y diciembre.
- Durante 2012 los meses de mayor turbiedad atmosférica en Chapinero corresponden a marzo, octubre y diciembre, y los de registros más bajos se encuentran en los meses de enero, febrero y abril. Mientras que en Nemocón los meses de elevados niveles de turbiedad fueron enero y el trimestre octubre-diciembre. Siendo mayo, julio y septiembre como los de menores índices de turbiedad atmosférica.
  
- Se recoge igual comportamiento de la turbidez atmosférica en Chapinero entre los años 2007 y 2012, aunque se muestra una ligera tendencia al incremento.
- Correlación significativa entre los valores de  $PM_{10}$  y el número de pacientes con ER para el año 2011, Hospital de Chapinero.
- La población más afectada por ER resulto ser la infantil destacándose la edad preescolar (menores de 5 años) con valores significativamente superiores.

**Anexo 9: Tesis de investigación presentada por ESTEVAN ARREDONDO**

**INSTITUTO DE METEOROLOGÍA  
CENTRO METEOROLÓGICO DE CAMAGÜEY  
DEPARTAMENTO DE RADARES**

**EFFECTO RADIATIVO DE LA NUBE DE AEROSOLLES DEL MONTE  
PINATUBO SOBRE EL GRAN CARIBE.**

**Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Meteorológicas.**

**RENÉ ESTEVAN ARREDONDO**

## Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.

La obtención y validación de la nueva base de datos de la ELC ha permitido el empleo de la misma, en un código de transferencia radiativa para el estudio del efecto radiativo de los aerosoles estratosféricos originados por la erupción del Monte Pinatubo. Los resultados obtenidos a partir de las comparaciones entre los datos de la ELC y los del SAGE II, tanto para períodos de calma volcánica como perturbados, demuestran la compatibilidad y complementariedad de ambos instrumentos. Partiendo de este presupuesto, ambas bases de datos pueden ser empleadas de conjunto para la modelación numérica del impacto radiativo de los aerosoles en la troposfera alta y la estratosfera baja (TA/EB).

La obtención de índices de correspondencias (PDMA) entre ambos instrumentos para diferentes estados de la TA/EB, ofrece la posibilidad de extender la cobertura de las mediciones realizadas con lidar, aprovechando la información suministrada por satélites, particularmente el SAGE II.

Los resultados obtenidos en el presente estudio para el período del Pinatubo, coinciden de forma general, con los obtenidos en análisis previos del mismo período. Las diferencias encontradas en este periodo están dentro del rango de variabilidad de origen natural de los aerosoles en la TA/EB bajo condiciones volcánicas.

Por primera vez en Cuba se calcula el efecto radiativo de los aerosoles estratosféricos originados por la erupción del volcán Monte Pinatubo, empleando para ello un código de transferencia radiativa de alta resolución. Por primera vez también, se simulan los efectos que provocarían los aerosoles originados por Súper – Erupciones en Cuba y el Gran Caribe, como consecuencia de la reducción severa y catastrófica de la radiación solar. Los cálculos fueron realizados empleando los datos de retrodispersión por aerosoles de la Estación Lidar de Camagüey, correspondientes al período de decrecimiento de la nube de aerosoles del Pinatubo, y en el caso del estudio de los efectos de las súper – erupciones se emplearon datos de Mauna Loa para completar la data de EOA del Pinatubo y darle un carácter tropical a los resultados obtenidos.

## Anexo 10: Artículo de divulgación presentado por ALISSON a la Agencia FAPESP

Agência **FAPESP** NOTÍCIAS VIDEOS SUSCRIPCIÓN

f t y r

20

La deforestación de la Amazonia incrementa la contaminación en países de América del Sur

21 de agosto de 2014

f t in e

Por Elton Alisson, desde Rio Branco (Acre)

**Agência FAPESP** – Los estados amazónicos brasileños de Pará, Rondônia, Amazonas y Acre han venido “exportado” el humo producto del desmonte con fuego hacia Bolivia, Perú y Paraguay, y han contribuido para que aumenten los niveles de polución atmosférica en esos países vecinos. Junto a Mato Grosso, esos cuatro estados también registran la mayor cantidad de focos de incendios de América del Sur.

Esta constatación surge de un estudio realizado por científicos del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (Inpe) de Brasil, que utilizaron la supercomputadora Tupã, instalada en dicha institución con recursos de la FAPESP y del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MCTI).

Algunos resultados de dicho estudio se dieron a conocer en una conferencia sobre el impacto trinacional de la quema de biomasa y del humo en la Amazonia Sudoccidental, realizada durante la 66ª Reunión Anual de la Sociedad Brasileña para el Progreso de la Ciencia (SBPC), que se extendió hasta el domingo 27 de julio, en el campus de la Universidad Federal de Acre (UFAC), en la localidad de Rio Branco.

“La mayor producción de humo resultante de incendios forestales en la América del Sur le corresponde a Brasil. El país realmente exporta humo de incendios y contamina a los demás países de la región”, declaró [Saulo Ribeiro de Freitas](#), investigador del Inpe, a Agência FAPESP.



El humo producido por el fuego en los estados brasileños amazónicos migra hacia Bolivia, Perú y Paraguay, elevando los niveles de polución atmosférica en esos países, según indica un estudio realizado en el Inpe (foto: *Wikipedia/Nasa*)

Anexo 11: Artículo periodístico presentado por MITMA al diario CORREO – Huancayo

**CORREO** Política Miscelánea Deportes Economía Ciudad Mundo Espectáculos Gastronomía Opinión MujerPandora

AREQUIPA AYACUCHO CHIMBOTE CUSCO HUANCAYO HUÁNUCO ICA LAMBAYEQUE LIMA LA LIBERTAD MOQUEGUA PASCO PIURA PUNO TACNA TUMBES

**Ciudad**

## Contaminación en Huancayo supera los niveles permitidos por el Estandar de Calidad Ambiental

Existe demasiado Dióxido de Azufre en el aire de la Inconstrastable y CAM empezará la vigilancia

**Es hora de cambiar de aires**

El Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) es un gas incoloro e inodoro que se produce durante la combustión de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo. Este gas puede causar problemas respiratorios y agravar enfermedades como el asma y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC). Además, puede contribuir a la formación de lluvia ácida y a la contaminación del agua.

**Para que cambien los niveles:**

- Usar combustibles limpios y de menor contenido de azufre.
- Mejorar la eficiencia energética de los procesos industriales.
- Promover el uso de energías renovables.
- Implementar tecnologías de control de emisiones.
- Fortalecer la legislación y la vigilancia ambiental.

**EL TANDU**

- SO<sub>2</sub>: 12.5 µg/m<sup>3</sup>
- PM<sub>10</sub>: 15 µg/m<sup>3</sup>
- PM<sub>2.5</sub>: 10 µg/m<sup>3</sup>

**CHILCA**

- SO<sub>2</sub>: 18.5 µg/m<sup>3</sup>
- PM<sub>10</sub>: 20 µg/m<sup>3</sup>
- PM<sub>2.5</sub>: 15 µg/m<sup>3</sup>

**HUANCAYO**

- SO<sub>2</sub>: 25 µg/m<sup>3</sup>
- PM<sub>10</sub>: 25 µg/m<sup>3</sup>
- PM<sub>2.5</sub>: 18 µg/m<sup>3</sup>

Contaminación en Huancayo supera los niveles permitidos por el Estandar de Calidad Ambiental

23 de Noviembre del 2015 - 09:07 - Textos: Daniel Mitma - Fotos: Correo

Anexo 12: Pasos para la descarga de datos de AERONET.

The screenshot shows the AERONET Data Download Tool interface. The main header is "AEROSOL ROBOTIC NETWORK". Below it, there are navigation tabs for different data types: AEROSOL OPTICAL DEPTH, AEROSOL INVERSIONS, SOLAR FLUX, OCEAN COLOR, and MARITIME AEROSOL. The "AEROSOL OPTICAL DEPTH" tab is selected, and the "Version 3 Direct Sun Algorithm" is highlighted.

The interface includes a sidebar with navigation options: Home, Aerosol Optical Depth, AEROSOL/FLUX NETWORKS, CAMPAIGNS, COLLABORATORS, DATA, LOGISTICS, NASA PROJECTS, OPERATIONS, PUBLICATIONS, SITE INFORMATION, STAFF, and SYSTEM DESCRIPTION. Under "AERONET DATA ACCESS", there are options for DATA SYNERGY TOOL (Data Display) and AEROSOL OPTICAL DEPTH (v3) (Data Display, Download Tool, Web Service).

The main content area shows the "AERONET Data Download Tool" for "Version 3 Direct Sun Algorithm". It prompts the user to "Click Geographic Region, Country/State or AERONET Site to change site selection:". The current selection is "South\_America" for Geographic Region, "Peru" for Country/State, and "Huancayo-IGP" for AERONET Site.

The user is prompted to "Download Data for Huancayo-IGP" and to "Select the start and end time of the data download period:". The start time is set to "1 SEP 2015" and the end time is set to "31 SEP 2015".

There are links for "Data Descriptions" and "Data Units". A note states: "Note: Data are not available if the data type is italicized". The user is prompted to "Select the data type(s) using the corresponding check box:".

Direct Sun Products	Select
Aerosol Optical Depth (AOD) with Precipitable Water and Angstrom Parameter	Level 1.0 <input type="checkbox"/> Level 1.5 <input checked="" type="checkbox"/> Level 2.0 <input type="checkbox"/>
Total Optical Depth (with components) based on AOD Level*	Level 1.0 <input type="checkbox"/> Level 1.5 <input type="checkbox"/> Level 2.0 <input type="checkbox"/>
Spectral Deconvolution Algorithm (SDA) Retrievals -- Fine Mode AOD, Coarse Mode AOD, and Fine Mode Fraction	Level 1.0 <input type="checkbox"/> Level 1.5 <input type="checkbox"/> Level 2.0 <input type="checkbox"/>

Below the table, there is a "Data Format" section with radio buttons for "All Points" (selected), "Daily Averages", and "Monthly Averages". A "Download" button is located at the bottom right of the interface.

### Anexo 13: Script para el procesamiento de datos de AERONET.

```
Editor - D:\TESIS\AERONET\RENAOOD_classificacion.m
EDITOR PUBLISH VIEW
New Open Save Compare Print Insert Comment Go To Breakpoints Run Run and Time Run and Advance Run Section
FILE EDIT NAVIGATE BREAKPOINTS RUN
[AOD_classificacion.m] MODIS_Casos (6).m
1 AOD_cimel Level 1.5
2 ** Constantes
3 clear all;
4 clo;
5 color_mari = [ 0 0 254]/255;
6 color_cont = [211 104 32]/255;
7 color_dust = [237 173 15]/255;
8 color_mixi = [130 130 130]/255;
9 color_poll = [ 0 0 0]/255;
10 color_biom = [ 73 149 0]/255;
11 pie_color = {color_mari;...
12 color_cont;...
13 color_dust;...
14 color_mixi;...
15 color_poll;...
16 color_biom};
17
18
19 months = {'Jan';'Feb';'Mar';'Apr';'May';'Jun';'Jul';'Aug';'Sep';'Oct';'Nov';'Dec'};
20 f_only_date = 'dd-mm-yyyy';
21 f_date_format = 'dd-mm-yyyy\tHH:MM:SS';
22 date_format = 'dd/mm/yyyy-HH:MM:SS';
23 ini_date = datenum(2015,3,19,0,0,0);
24
25 ** Inicio
26 fprintf('Seleccionar Longitud de Onda:\n');
27 fprintf(' 1- 1020 nm\n');
28 fprintf(' 2- 870 nm\n');
29 fprintf(' 3- 675 nm\n');
30 fprintf(' 4- 555 nm\n');
...
204 c_mixi = c_mixi + 1;
205 aod_mixi(c_mixi) = aod_sel(1);
206 ang_mixi(c_mixi) = Ang_4_8(1);
207 dat_mixi(c_mixi) = datenum(strcat(Date(1),'-',Time(1)),date_format);
208 end;
209
210 % Tipo Contaminado
211 if (Ang_4_8(1) > 1.5)
212     if ( (aod_sel(1) > 0.153) && (aod_sel(1) <= 0.38) )
213         c_poll = c_poll + 1;
214         aod_poll(c_poll) = aod_sel(1);
215         ang_poll(c_poll) = Ang_4_8(1);
216         dat_poll(c_poll) = datenum(strcat(Date(1),'-',Time(1)),date_format);
217     end;
218 end;
219 % Tipo Biomasa
220 if (Ang_4_8(1) > 1.5)
221     if (aod_sel(1) > 0.38)
222         c_biom = c_biom + 1;
223         aod_biom(c_biom) = aod_sel(1);
224         ang_biom(c_biom) = Ang_4_8(1);
225         dat_biom(c_biom) = datenum(strcat(Date(1),'-',Time(1)),date_format);
226     end;
227 end;
228 else
229     c_nova = c_nova + 1;
230 end;
231 end;
232
```

## Anexo 14: Pasos para la descarga de datos de MODIS.

EARTHDATA Data Discovery DAACs Community Science Disciplines

**LAADS DAAC** About LAADS Search & Order Data Discovery Quality Help Profile

### Search for Data Products

If you know the file names of the products for which you are searching, you may also search for file names.

#### Product Selection

Please select one or more products: [View Help](#)

**Satellite/Instrument:**

**Group:**

**Products:**

- MYD04\_3K - MODIS/Aqua Aerosol 5-Min L2 Swath 3km
- MYD04\_L2 - MODIS/Aqua Aerosol 5-Min L2 Swath 10km**
- MYD05\_L2 - MODIS/Aqua Total Precipitable Water Vapor 5-Min L2 Swath 1km and 5km
- MYD06\_L2 - MODIS/Aqua Clouds 5-Min L2 Swath 1km and 5km
- MYD07\_L2 - MODIS/Aqua Temperature and Water Vapor Profiles 5-Min L2 Swath 5km
- MYD07\_QC - MODIS/Aqua Vertical Profiles Diagnostics 5-Min L2 5km
- MYD35\_L2 - MODIS/Aqua Cloud Mask and Spectral Test Results 5-Min L2 Swath 250m and 1km
- MYD35\_QC - MODIS/Aqua Cloud Mask and Spectral Test Diagnostics 5-Min L2 250m and 1km
- MYDARNSS - Atmosphere Aeronet subsetting Product

### Temporal Selection

Please enter the temporal information in either MM/DD/YYYY or YYYY-DDD format: [View Help](#)

**Temporal Type:**

**Start Date and Time:**  **End Date and Time:**

### Collection Selection

Please select a collection: [View Help](#)

**Collection:**

Collection 5.1 contains a full set of the Aqua products MYD04\_L2, MYD05\_L2, MYD06\_L2, MYDATML2, MYD08\_D3, MYD08\_E3, and MYD08\_M3 and the Terra products MOD04\_L2, MOD05\_L2, MOD06\_L2, MODATML2, MOD08\_D3, MOD08\_E3, and MOD08\_M3. These products can no longer be found in Collection 5.

### Spatial Selection

Please enter the coordinates for your area of interest. [View Help](#)

**Coordinate System:**

In addition to entering the coordinates, users with Javascript enabled browsers may use their mouse to select a region on the map or select one of the predefined regions.

**Specify Bounding Box Coordinates as:**

North, West, East, South

North:

West:  East:

South:

**Predefined Regions:**

- Coastal West Africa
- Continental US
- Indian Subcontinent
- Sea of Japan
- US West Coast
- Whole Earth

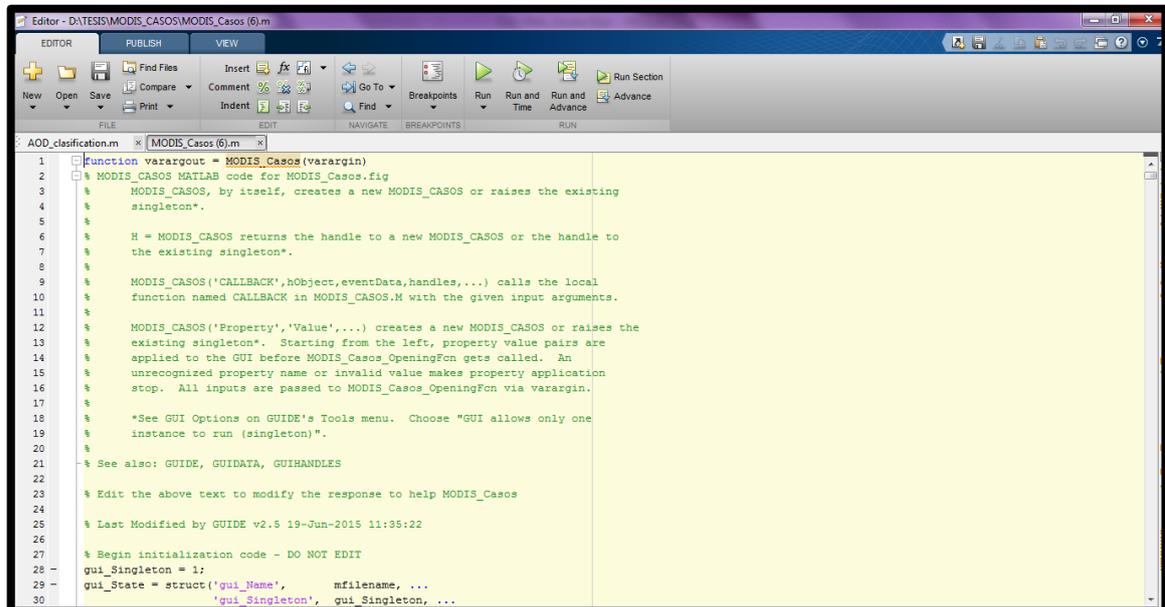
### Coverage Selection

You may also specify coverage for the following products: MYD04\_L2. [View Help](#)

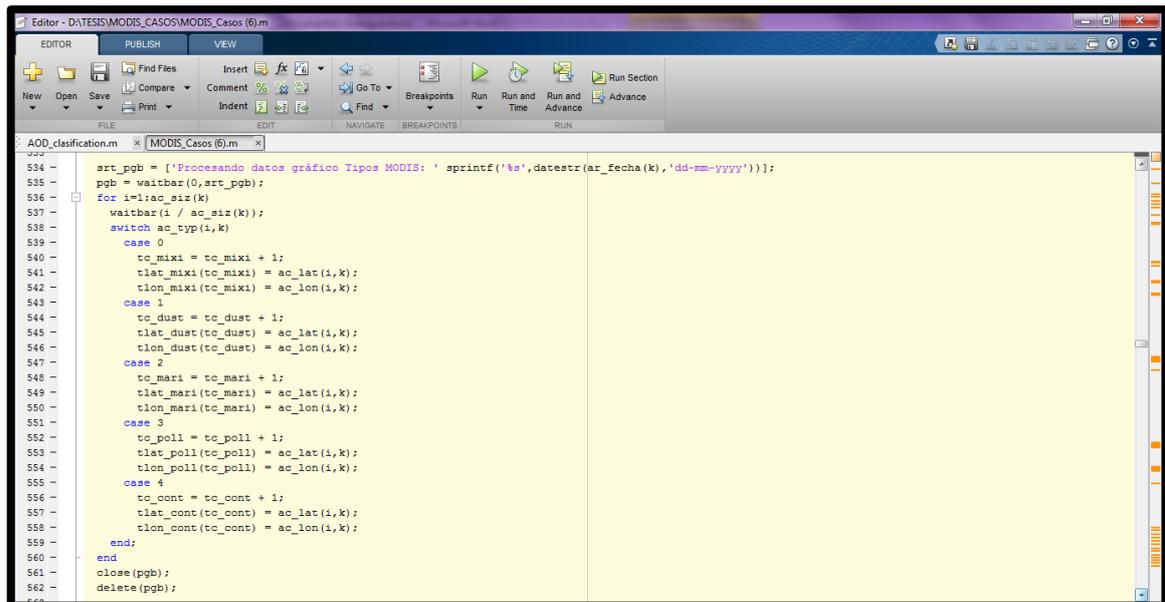
**Coverage Options:**

- Day (granules contain day data only)
- Night (granules contain night data only)
- Both (granules contain both day and night data)

## Anexo 15: Script para el procesamiento de los datos de MODIS.



```
1 function varargout = MODIS_Casos(varargin)
2 % MODIS_CASOS MATLAB code for MODIS_Casos.fig
3 % MODIS_CASOS, by itself, creates a new MODIS_CASOS or raises the existing
4 % singleton*.
5 %
6 % H = MODIS_CASOS returns the handle to a new MODIS_CASOS or the handle to
7 % the existing singleton*.
8 %
9 % MODIS_CASOS('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
10 % function named CALLBACK in MODIS_CASOS.M with the given input arguments.
11 %
12 % MODIS_CASOS('Property','Value',...) creates a new MODIS_CASOS or raises the
13 % existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
14 % applied to the GUI before MODIS_Casos_OpeningFcn gets called. An
15 % unrecognized property name or invalid value makes property application
16 % stop. All inputs are passed to MODIS_Casos_OpeningFcn via varargin.
17 %
18 % *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
19 % instance to run (singleton)".
20 %
21 % See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
22
23 % Edit the above text to modify the response to help MODIS_Casos
24
25 % Last Modified by GUIDE v2.5 19-Jun-2015 11:35:22
26
27 % Begin initialization code - DO NOT EDIT
28 gui_Singleton = 1;
29 gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
30                   'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
```



```
534 srt_pgb = ['Procesando datos gráfico Tipos MODIS: ' sprintf('%s', datestr(ar_fecha(k), 'dd-mm-yyyy'))];
535 pgb = waitbar(0, srt_pgb);
536 for i=1:ac_siz(k)
537     waitbar(i / ac_siz(k));
538     switch ac_typ(i,k)
539     case 0
540         tc_mixa = tc_mixa + 1;
541         tlat_mixa(tc_mixa) = ac_lat(i,k);
542         tlon_mixa(tc_mixa) = ac_lon(i,k);
543     case 1
544         tc_dust = tc_dust + 1;
545         tlat_dust(tc_dust) = ac_lat(i,k);
546         tlon_dust(tc_dust) = ac_lon(i,k);
547     case 2
548         tc_mari = tc_mari + 1;
549         tlat_mari(tc_mari) = ac_lat(i,k);
550         tlon_mari(tc_mari) = ac_lon(i,k);
551     case 3
552         tc_poll = tc_poll + 1;
553         tlat_poll(tc_poll) = ac_lat(i,k);
554         tlon_poll(tc_poll) = ac_lon(i,k);
555     case 4
556         tc_cont = tc_cont + 1;
557         tlat_cont(tc_cont) = ac_lat(i,k);
558         tlon_cont(tc_cont) = ac_lon(i,k);
559     end;
560 end
561 close(pgb);
562 delete(pgb);
```

```
Editor - DATESIS\MODIS_CASOS\MODIS_Casos (6).m
EDITOR PUBLISH VIEW
New Open Save Find Files Insert Comment Indent Go To Breakpoints Run Run and Time Run and Advance Run Section
FILE EDIT NAVIGATE BREAKPOINTS RUN
AOD_classification.m MODIS_Casos (6).m
741 - ang_mixi(c_mixi) = ac_ang(1,k);
742 - lat_mixi(c_mixi) = ac_lat(1,k);
743 - lon_mixi(c_mixi) = ac_lon(1,k);
744 - end;
745 - end;
746 - % Tipo Contaminado
747 - if (ac_ang(1,k) > 1.5)
748 -     if ( (ac_aod(1,k) > 0.153) && (ac_aod(1,k) <= 0.38) )
749 -         c_poll = c_poll + 1;
750 -         aod_poll(c_poll) = ac_aod(1,k);
751 -         ang_poll(c_poll) = ac_ang(1,k);
752 -         lat_poll(c_poll) = ac_lat(1,k);
753 -         lon_poll(c_poll) = ac_lon(1,k);
754 -     end;
755 - end;
756 - % Tipo Biomasa
757 - if (ac_ang(1,k) > 1.5)
758 -     if (ac_aod(1,k) > 0.38)
759 -         c_biom = c_biom + 1;
760 -         aod_biom(c_biom) = ac_aod(1,k);
761 -         ang_biom(c_biom) = ac_ang(1,k);
762 -         lat_biom(c_biom) = ac_lat(1,k);
763 -         lon_biom(c_biom) = ac_lon(1,k);
764 -     end;
765 - end;
766 - end;
767 - end;
```

## Anexo 16: Pasos para la descarga de datos de HYSPLIT.



**PASO 1**

**ARL**  
**Air Resources Laboratory**  
Advancing Atmospheric Science and Technology through Research

ARL Home > READY > Transport & Dispersion Modeling > HYSPLIT > HYSPLIT Trajectory Model



- [Compute forecast trajectories](#)
- [Compute archive trajectories](#)
- [Retrieve previous model results](#)
- [Restart user session \(clear user inputs\)](#)
- [Current pre-computed U.S. trajectory forecasts](#)
- [Trajectory optimization for balloon flights](#)
- [Return to main HYSPLIT page](#)

**Daily Limits**  
Users are limited to 500 trajectories per day in order to share the resources available with all HYSPLIT users.

**Publishing HYSPLIT results**  
Publications using HYSPLIT results, maps or other READY products provided by NOAA ARL are requested to include an acknowledgement of, and citation to, the NOAA Air Resources Laboratory. Appropriate versions of the following are recommended:

**Citation**  
Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., and Ngan, F., (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96**, 2059-2077, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>

Rolph, G.D. (2016). *Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) Website* (<http://www.ready.noaa.gov>). NOAA Air Resources Laboratory, College Park, MD.

**Acknowledgment**  
The authors gratefully acknowledge the NOAA Air Resources Laboratory (ARL) for the provision of the HYSPLIT transport and dispersion model and/or READY website (<http://www.ready.noaa.gov>) used in this publication.

<https://ready.arl.noaa.gov/hypub-bin/trajtype.pl?runtype=archive>



**Air Resources Laboratory**  
Advancing Atmospheric Science and Technology through Research

PASO 2



ARL Home > READY > Transport & Dispersion Modeling > HYSPLIT > HYSPLIT Trajectory Model


### Meteorology & Starting Location(s)

Trajectory Calculation

**Meteorology:** GDAS (1 degree, global, 2006-present) [More info](#) ▶

**Source Location** (enter using one of the following methods):

Open Map Display

Decimal Degrees Latitude: -12.04 N Longitude: -75.32 W

DDD/MM/SS Latitude:       N Longitude:       W

Deg.      Min.      Sec.                      Deg.      Min.      Sec.

City (Country or State; name: lat: lon):  

Airport or WMO ID (i.e., dca):   [ID Lookup](#)



[Privacy Policy](#) | [Contact Us](#)  
 Web site owner: Air Resources Laboratory, NOAA's Office of Atmospheric Research, National Oceanic and Atmospheric Administration.



**Air Resources Laboratory**  
Advancing Atmospheric Science and Technology through Research

PASO 3



ARL Home > READY > Transport & Dispersion Modeling > HYSPLIT > HYSPLIT Trajectory Model


### Meteorology & Starting Location(s)

**Meteorology:** GDAS1

**Source Location:** 040000 Lon: -75.320000

**Choose an archive file:** current7days



[Privacy Policy](#) | [Contact Us](#)  
 Web site owner: Air Resources Laboratory, NOAA's Office of Atmospheric Research, National Oceanic and Atmospheric Administration.

PASO 4

### Model Run Details

[Request trajectory](#)

The archived data file (GDAS1) has data beginning at 09/15/15 0000 UTC.

#### Model Parameters

**Trajectory direction:**  Forward  
 Backward (Change the default start time!) [More info](#) ▶

**Vertical Motion:**  Model vertical velocity [More info](#) ▶  
 Isobaric  
 Isentropic

**Start time (UTC):** Current time: 22:50  
 year: 15 month: 09 day: 17 hour: 14 [More info](#) ▶

**Total run time (hours):** 72 [More info](#) ▶

**Start a new trajectory every:** 0 hrs **Maximum number of trajectories:** 24 [More info](#) ▶

**Start 1 latitude (degrees):** -12.040000 [More info](#) ▶

**Start 1 longitude (degrees):** -75.320000 [More info](#) ▶

**Start 2 latitude (degrees):**

**Start 2 longitude (degrees):**

**Start 3 latitude (degrees):**

**Start 3 longitude (degrees):**

**Level 1 height:** 500  meters AGL  meters AMSL [More info](#) ▶

**Level 2 height:** 1500

**Level 3 height:** 3500

#### Display Options

**GIS output of contours?**  None  Google Earth (kmz)  GIS Shapefile [More info](#) ▶

PASO 5

### Model Run Details

[Request trajectory](#)

The archived data file (GDAS1) has data beginning at 09/15/15 0000 UTC.

#### Model Parameters

**Trajectory direction:**  Forward  
 Backward (Change the default start time!) [More info](#) ▶

**Vertical Motion:**  Model vertical velocity [More info](#) ▶  
 Isobaric  
 Isentropic

**Start time (UTC):** Current time: 22:50  
 year: 15 month: 09 day: 17 hour: 18 [More info](#) ▶

**Total run time (hours):** 72 [More info](#) ▶

**Start a new trajectory every:** 0 hrs **Maximum number of trajectories:** 24 [More info](#) ▶

**Start 1 latitude (degrees):** -12.040000 [More info](#) ▶

**Start 1 longitude (degrees):** -75.320000 [More info](#) ▶

**Start 2 latitude (degrees):**

**Start 2 longitude (degrees):**

**Start 3 latitude (degrees):**

**Start 3 longitude (degrees):**

**Level 1 height:** 500  meters AGL  meters AMSL [More info](#) ▶

**Level 2 height:** 1500

**Level 3 height:** 3500

#### Display Options

**GIS output of contours?**  None  Google Earth (kmz)  GIS Shapefile [More info](#) ▶

# HYSPLIT Trajectory Model Results

## PASO 6

**HYSPLIT MODEL RESULTS FOR JOB NUMBER 192012**

**Model Status:** Fri Dec 16 17:54:13 EST 2016  
 The model and graphics are now complete.  
 Finished generating graphics for job 192012.

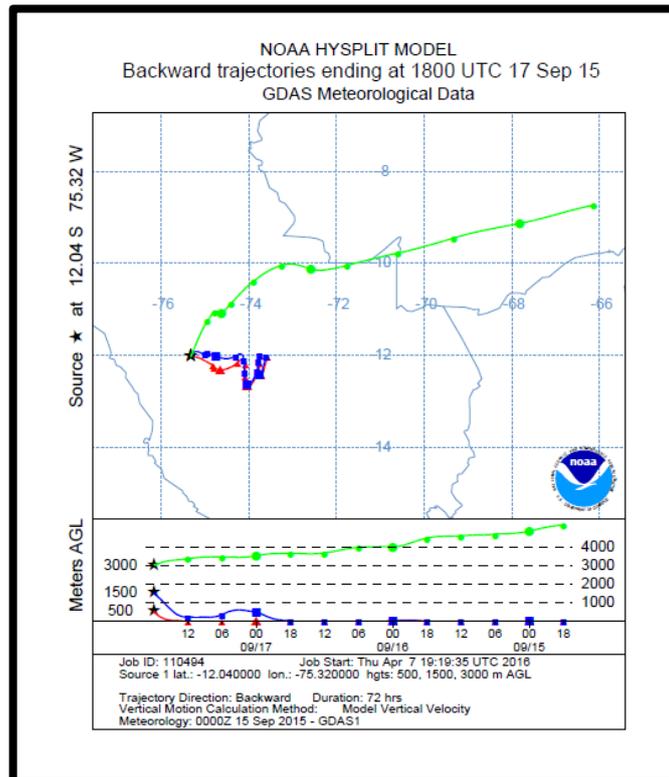
RESULTS	Click on text link to view images in a new window.			
	GIF Plots	PDF Plots	Google Earth	Flash Maps
Trajectories	<a href="#">.gif</a>	<a href="#">.pdf</a>	<a href="#">.kmz</a>	<a href="#">.kmz</a>

- [Modify the trajectory plot without rerunning the model.](#)
- [Trajectory endpoints file.](#)
  - [Trajectory endpoints format help.](#)
- [HYSPLIT SETUP file.](#)
- [HYSPLIT CONTROL file.](#)
- [HYSPLIT MESSAGE \(diagnostics\) file.](#)
  - [MESSAGE file format help \(pdf\)](#)

[Return to main menu \(keep user inputs\)](#)

[Return to main menu \(clear user inputs\)](#)

## RESULTADO



Anexo 17: Valor del albedo de vegetación (RICHIAZZI, y otros, 1998).

```

                                SURFACE REFLECTANCE PROPERTIES
                                =====|
ISALB:                          SURFACE ALBEDO FEATURE
                                -1 -spectral surface albedo read from "albedo.dat
                                0 -user specified, spectrally uniform albedo set
ALBCON
                                1 -snow
                                2 -clear water
                                3 -lake water
                                4 -sea water
                                5 -sand (data range 0.4 - 2.3um)
                                6 -vegetation (data range 0.4 - 2.6um)

```