

UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“ANÁLISIS DE LA VARIACION TEMPORAL DEL ESPESOR ÓPTICO Y
LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DEL AEROSOL ATMOSFÉRICO EN
LA CIUDAD DE HUANCAYO EN EL AÑO 2016”**

TESIS

Para optar el Título Profesional de

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR EL BACHILLER

ARRATEA MORAN, JESSICA ROCIO

ASESOR

SANCHEZ CCOYLLO, ODON ROMAN

Villa El Salvador

2021

DEDICATORIA

Al personaje que estuvo todo el tiempo durante el concebimiento de esta investigación,

A esas noches de inspiración,

A esas amanecidas de redacción,

A las lágrimas que di cuando no entendía algo,

A la exigencia de mi tutor,

Al consejo que recibí de mi señora madre,

*En fin, a todo lo que causo que presente mi investigación,
por qué no cambiaría ningún acontecimiento que originó lo que hoy
soy.*

AGRADECIMIENTOS

A mi gran maestro el Dr. Odón Sánchez Ccoyllo que vio en mi cierta habilidad y me impulsó a investigar y a aprender nuevas cosas,
Al Proyecto MAGNET-IGP
“Fortalecimiento de la línea de investigación en física y microfísica de la atmósfera”
(Convenio N° 010-2017-FONDECYT) del Instituto Geofísico del Perú por la facilidad en la adquisición de los datos,
Al grupo humano que organizó la 6ta Escuela Nacional de Investigación en Ciencias de la atmósfera en Huancayo por compartirme grandes conocimientos,
A mis amistades, que me oyeron y leyeron y siempre estuvieron dispuestos(as) a apoyarme,
A todos, los que me permitieron conocerlos y regalarles un momento de alegría con mis ocurrencias.

RESUMEN

Con el motivo de analizar la variación temporal del espesor óptico del aerosol atmosférico (AOD) y conocer la distribución de sus tamaños en la provincia de Huancayo en el año 2016. Primero, se realiza un análisis de los datos observados por el fotómetro, los cuales previamente son correlacionados con los registros estimados por los satélites AQUA y TERRA obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.44 y 0.62 respectivamente con un valor de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y BIAS de 0.08 y -0.04 para TERRA; y, 0.06 y -0.03 para AQUA. Lo que nos indica claramente que existe cierta subestimación por parte del instrumento MODIS en ambos casos. Adicionalmente, se realiza un análisis diario, mensual y estacional del espesor óptico del aerosol y se analiza los meses en los que se obtuvo mayores niveles de AOD fundamentando a que se debió estos niveles con los inventarios de focos activos de quema de biomasa en la Amazonía Peruana. Además, se consideró la cantidad de agua precipitable para la región y se comparó con los valores de AOD distribuidos estacionalmente. Con ayuda del coeficiente de angstrom, se puede tipificar a los aerosoles presentes en la zona durante el 2016. Para la obtención de los resultados, se graficó la distribución de los tamaños del aerosol volumen-tamaño con el propósito de identificar los tipos de partículas presentes en el periodo de estudio. A partir de ello, se obtuvo que el mayor valor de las medias diarias de AOD se obtuvo el 14 de septiembre con **0.3309**, el cual fue originado debido a la gran quema de biomasa en esa época del año, que mediante un análisis de las retrotrayectorias (trayectorias de llegada al observatorio de Huancayo) se infirió que las corrientes de aire arrastraron las partículas desde los departamentos de Ucayali, Loreto, Huánuco y Pasco; que coincidentemente es el mes de septiembre con 4102 focos activos detectados. Para el caso de la variabilidad mensual es el mes de septiembre con el mayor valor con **0.1186±0.0651**. A nivel estacional son los meses de invierno, primavera y verano en los que se registran mayores niveles de AOD que coinciden con las bajas precipitaciones en esos meses. Por último, el análisis de la distribución de tamaños nos indica que hay una ligera predominancia del modo grueso del modo fino en el periodo de estudio, que adicionalmente se identificaron 6 tipos de aerosoles como son continental, marítimo, contaminado, polvo, biomasa y mezcla.

ABSTRACT

In order to analyze the temporal variation of the Aerosol Optical Depth (AOD) of the atmospheric, moreover, to know the distribution of its sizes in the city of Huancayo in 2016. First of all, an analysis of the data observed by the photometer is performed, which they are previously correlated with the data set estimated by the AQUA and TERRA satellites, obtaining a correlation coefficient of 0.44 and 0.62, respectively, with a Root Mean Square Error (RMSE) and BIAS value of 0.08 and -0.04 for TERRA; and, 0.06 and 0.03 for AQUA. Those indicate there is a certain underestimation by the MODIS instrument in both cases. In addition, a daily, monthly and seasonal analysis of the AOD is implemented and the months in which the highest levels of AOD were obtained are analyzed, based on the reasons for these levels with the inventories of active sources of biomass burning in the Peruvian Amazon. In addition, the amount of precipitable water for the region was considered and compared with the seasonally distributed AOD values. With the help of the angstrom coefficient, it is possible to classify the types of aerosols present in the area during 2016. To obtain the results, the distribution of the sizes of the aerosol volume-size was graphed in order to identify the types of particles present in the study period. From this, it was obtained that the highest value of the daily means of AOD was obtained on September 14 with 0.3309, which was originated due to the great burning of biomass at that time of the year, which by means of an analysis of the back trajectories (arrival trajectories at the Huancayo observatory) it was inferred that the air the particles originated from the departments of Ucayali, Loreto, Huánuco and Pasco; which coincidentally is the month of September with 4102 active sources detected. In the case of monthly variability, it is the month of September with the highest value with 0.1186 ± 0.0651 . At the seasonal level, it is the winter, spring and summer months in which the highest levels of AOD are recorded, which coincide with the low rainfall in those months. Finally, the analysis of the distribution of sizes indicates that there is a slight predominance of the coarse mode of the fine mode in the study period, which additionally identified 6 types of aerosols such as continental, maritime, polluted, dust, biomass and mixture .

INDICE

INTRODUCCIÓN	xiii
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Motivación	1
1.2. Estado del arte	1
1.3. Descripción del problema	5
1.4. Formulación del problema	7
1.4.1. Problema general	7
1.4.2. Problemas específicos.....	7
1.5. Objetivos	7
1.5.1. Objetivo general	7
1.5.2. Objetivos específicos	7
1.6. Justificación	8
II. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Antecedentes	9
2.2. Bases teóricas	12
III. VARIABLES E HIPÓTESIS	29
3.1. Operacionalización de variables	29
3.2. Hipótesis de la investigación.....	31
3.2.1. Hipótesis general	31
3.2.2. Hipótesis específicas.....	31
IV. METODOLOGÍA	32
4.1. Descripción de la metodología.....	32
4.2. Implementación de la investigación.....	41
4.3. Población y muestra	41
4.4. Técnicas de recolección y datos	41
4.5. Instrumentos de recolección de datos	42

4.6. Resultados	44
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	77
VI. CONCLUSIONES	79
VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Micrografía de una partícula de aerosol atmosférico compuesta de Aluminio (Al), Silicio (Si) y Calcio (Ca). Recuperado del trabajo <i>Relação entre a profundidade ótica dos aerossóis e a radiação solar incidente em área do cerrado Mato-Grossense</i> (Dutra, 2015).	12
Figura 2. Esquema idealizado de la distribución y procesos que afectan los aerosoles atmosféricos. Se indican los modos principales, las fuentes y los mecanismos de formación y eliminación de partículas. Adaptado por (Seinfeld et al., 1998). Original de (Whitby & Cantrell, 1976).	15
Figura 3. Distribución de tamaños expresada en número $n(r)$, superficie $s(r)$ y volumen $v(r)$. Recuperado del trabajo <i>Estudio de los aerosoles atmosféricos en valencia mediante medidas del Nefelómetro de integración</i> (Esteve, 2011).	19
Figura 4. Estaciones de la Red AERONET a nivel mundial. Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA). Recuperado de la web de AERONET https://aeronet.gsfc.nasa.gov/	23
Figura 5. Fotómetro solar del Observatorio de Huancayo – Perú. Instituto Geofísico del Perú.	25
Figura 6. Mapa de ubicación del área de estudio. Elaboración propia.	32
Figura 7. Mapa de ubicación de selección de cuadrícula espacial. Elaboración propia.	34
Figura 8. Cuadrícula espacial de 25 x 25 km. Recuperado de https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/	35
Figura 9. Estaciones de la Red AERONET a nivel mundial. Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA). Recuperado de la web de AERONET https://aeronet.gsfc.nasa.gov/	37
Figura 10. Correlación del espesor óptico del aerosol procedentes del satélite AQUA frente a AERONET.	45
Figura 11. Variabilidad anual del espesor óptico del aerosol del satélite AQUA y AERONET.	45
Figura 12. Medias diarias del espesor óptico del aerosol procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.	47
Figura 13. Variabilidad anual del espesor óptico del aerosol del satélite AQUA y AERONET.	47

Figura 14. Variabilidad diaria del espesor óptico del aerosol procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	49
Figura 15. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de enero procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	50
Figura 16. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de febrero procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	50
Figura 17. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de marzo procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	51
Figura 18. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de abril procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	51
Figura 19. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de mayo procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	52
Figura 20. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de junio procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	52
Figura 21. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de julio procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	53
Figura 22. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de agosto procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	53
Figura 23. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de septiembre procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	54
Figura 24. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de octubre procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	54
Figura 25. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de noviembre procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	55
Figura 26. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de diciembre procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	55
Figura 27. Calendario del espesor óptico del aerosol procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	56
Figura 28. Variabilidad mensual del espesor óptico del aerosol procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	57
Figura 29. Gráfica de caja del espesor óptico del aerosol procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	58
Figura 30. Media estacional del espesor óptico del aerosol procedente del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	59

Figura 31. Variabilidad temporal del agua precipitable en cm procedentes del Observatorio de Huancayo del año 2016.....	60
Figura 32. Media mensual de focos activos detectados por satélite en Perú del año 2016. Recuperado de http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_paises/	61
Figura 33. (a) Mapa de focos de calor detectados por los sensores MODIS y VIIRS, elaboración propia. (b) Retrotrayectoria de masa de aire del 08 al 14 de septiembre del 2016 a 500 m AGL, recuperado de https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php . (c) Focos de calor detectados por satélite del 08 al 14 de septiembre del 2016, recuperado de http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas#	63
Figura 34. (a) Mapa de focos de calor detectados por los sensores MODIS y VIIRS, elaboración propia. (b) Retrotrayectoria de masa de aire del 08 al 14 de septiembre del 2016 a 1000 m AGL, recuperado de https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php . (c) Focos de calor detectados por satélite del 08 al 14 de septiembre del 2016, recuperado de http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas#	64
Figura 35. Mapa de focos de calor detectados por los sensores MODIS y VIIRS, elaboración propia. (b) Retrotrayectoria de masa de aire del 08 al 14 de septiembre del 2016 a 1500 m AGL, recuperado de https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php . (c) Focos de calor detectados por satélite del 08 al 14 de septiembre del 2016, recuperado de http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas#	65
Figura 36. Mapa de focos de calor detectados por los sensores MODIS y VIIRS, elaboración propia. (b) Retrotrayectoria de masa de aire del 08 al 14 de septiembre del 2016 a 2000 m AGL, recuperado de https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php . (c) Focos de calor detectados por satélite del 08 al 14 de septiembre del 2016, recuperado de http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas#	66
Figura 37. Mapa de focos de calor detectados por los sensores MODIS y VIIRS, elaboración propia. (b) Retrotrayectoria de masa de aire del 08 al 14 de septiembre del 2016 a 2500 m AGL, recuperado de https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php . (c) Focos de calor detectados por satélite del 08 al 14 de septiembre del 2016, recuperado de http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas#	67
Figura 38. Mapa de focos de calor detectados por los sensores MODIS y VIIRS, elaboración propia. (b) Retrotrayectoria de masa de aire del 08 al 14 de septiembre del 2016 a 3000 m AGL, recuperado de https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php . (c) Focos de calor	

<i>detectados por satélite del 08 al 14 de septiembre del 2016, recuperado de http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas#.....</i>	<i>68</i>
Figura 39. <i>Retrotrayectorias de masas de aire a 500, 1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 m AGL para 168 horas desde el 14 de septiembre de 2016. Elaboración propia.....</i>	<i>69</i>
Figura 40. <i>Modelo de pronóstico e investigación del tiempo con un modelo que química que permite estimar las concentraciones de material particulado (PM10). Elaborado por el Dr. René Estevan (investigador del Instituto Geofísico del Perú).</i>	<i>70</i>
Figura 41. <i>Distribución del tamaño del aerosol atmosférico. Elaboración propia.</i>	<i>71</i>
Figura 42. <i>Diagrama de dispersión de la profundidad óptica del aerosol (550 nm) frente al parámetro de angstrom (440 a 870 nm).....</i>	<i>72</i>
Figura 43. <i>Tipos de aerosoles identificados en el periodo de estudio en Huancayo</i>	<i>73</i>
Figura 44. <i>Porcentaje de aportación por tipo de aerosol.</i>	<i>74</i>
Figura 45. <i>Variabilidad horaria del espesor óptico del aerosol identificando los tipos de aerosoles.....</i>	<i>75</i>
Figura 46. <i>Aporte mensual de los tipos de aerosoles durante el año 2016 en Huancayo. 76</i>	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de partículas según su radio	20
Tabla 2 Características del Satélite TERRA	26
Tabla 3 Características del Satélite AQUA	27
Tabla 4 Coordenadas de los vértices de la cuadrícula de estudio.....	34
Tabla 5 Variables para la obtención de datos del sensor MODIS	36
Tabla 6 Pruebas realizadas a los datos procedentes de AERONET.....	41
Tabla 7 Fuentes de recolección de datos	42
Tabla 8 Análisis de la estimación de los datos de AOD registrados por el sensor MODIS frente a los de AERONET.....	43
Tabla 9 Características de los datos.....	43
Tabla 10 Información de los datos procedentes del satélite AQUA	44
Tabla 11 Información de los datos procedentes de la Red AERONET.....	44
Tabla 12 Información de los datos procedentes del satélite AQUA	46
Tabla 13 Información de los datos procedentes de la Red AERONET.....	46
Tabla 14 Variables estadísticas del análisis de correlación.....	48
Tabla 15 Resumen de variables estadísticas de las medias diarias del espesor óptico del aerosol	49
Tabla 16 Resumen de las variables estadísticas de las medias mensuales del espesor óptico del aerosol	57
Tabla 17 Resumen de las variables estadísticas de las medias estacionales del espesor óptico del aerosol	59
Tabla 18 Aporte porcentual de los tipos de aerosoles para cada mes del año 2016.....	76

INTRODUCCIÓN

Los aerosoles son partículas sólidas o líquidas de un diámetro muy pequeño entre 0.01 hasta 10 μm (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013) que permanecen en la atmósfera, sopesando su tamaño y la condición de la atmósfera (Scagliotti & Jorge, 2020). Estas partículas, aerosoles, tienen un impacto directo e indirecto tanto en el tiempo como en el clima e interactuando directamente sobre la radiación solar modificando indirectamente las propiedades de las nubes (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). El estudio de los aerosoles es importante para comprender su papel climático (World Meteorological Organization, 2016) y su consecuencia sobre la salud de la población (Romero Placeres, Álvarez Toste, & Álvarez Pérez, 2007).

Monitorear aerosoles resulta una tarea difícil, por ser variables que sufren cambios en la atmósfera (Scagliotti & Jorge, 2020), para ello existen los monitores satelitales y los terrestres. Los monitoreos satelitales poseen una gran cobertura espacial, pero dependen de la reflectancia de la superficie (Obradovic, Das, Radosavljevic, Ristovski, & Vucetic, 2010), mientras que los instrumentos que realizan mediciones en superficie, como es la red Aerosol Robotic Network (AERONET), que reportan información continua y con alta confiabilidad, pero con una cobertura limitada a los puntos de medición disponibles. Es así que el laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR) ubicado en el Observatorio de Huancayo del Instituto Geofísico del Perú, en el 2015 llega a instalar un fotómetro solar para la medición de aerosoles con lo cual el laboratorio pasó a integrar la red mundial AERONET de la Administración Nacional Aeronáutica del Espacio. Lo que permitió realizar estudios de las propiedades ópticas, microfísicas y radiactivas de los aerosoles y la validación de las mediciones de los registros realizados por los satélites (Instituto Geofísico del Perú, 2015).

Las mediciones de los aerosoles atmosféricos nos permiten estudiar las propiedades ópticas y físicas, y entre los principales estudios se tiene al espesor óptico del aerosol (AOD, por sus siglas en inglés) parámetro adimensional que altera en forma directa el clima debido a la dispersión y absorción de la radiación e indirectamente actuando como núcleos de condensación para la formación de nubes (Ángeles Suazo, 2013). Asimismo, la distribución de los tamaños es importante ya que otras propiedades de las partículas dependen de ella como son la velocidad de depósito gravitacional, el

volumen o la masa. El estudio de la distribución de los tamaños es fundamental porque nos va a permitir entender el comportamiento de los aerosoles (Martínez & Rodríguez de Torres, 2000). Finalmente, el parámetro de angstrom que junto con el espesor óptico del aerosol nos va a ayudar a identificar los tipos de aerosoles presentes puesto que existe una dependencia con la longitud de onda a un cierto rango espectral (Toledano, 2005).

Las principales fuentes de contaminación en el Perú constituyen los incendios forestales donde se tiene un aumento progresivo entre junio a agosto registrándose un número mayor de focos activos producidos por la quema de biomasa en la región central y norte del Perú. No obstante, Brasil y Bolivia contribuyeron a elevar los niveles del espesor óptico del aerosol durante el periodo mencionado (Moya Álvarez, Arredondo, & Yuli Posadas, 2017). Sin embargo, en la ciudad de Huancayo se han identificado otros tipos de aerosoles característicos del lugar como son los de tipo continental, marítimo, urbanos-industriales, mezcla y polvo (Núñez Romero, 2017).

Por tal motivo, este estudio tiene la finalidad de estudiar la variabilidad del espesor óptico del aerosol de manera diaria, mensual y estacional, que mediante trayectorias de las masas de aire y los focos activos detectados se analiza los posibles escenarios de arrastre de partículas por causa de los incendios forestales. Además, se analiza la distribución de los tamaños de los aerosoles y se identifica las partículas predominantes en el periodo de estudio. Finalmente, se tipifica los tipos de aerosoles para ese año y su aporte mensual y anual.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Motivación

Se puede definir al aire como un “gas que está presente en la atmósfera, constituido en particular de oxígeno y nitrógeno, y otros compuestos como el dióxido de carbono y el vapor de agua”. No obstante, en el aire hay mucho más que “otros compuestos”. Por ejemplo, cuando vemos la luz que proyecta sobre una película podemos observar pequeñas partículas suspendidas. Estas partículas son aerosoles atmosféricos. Los aerosoles, son partículas muy pequeñas que pueden estar en estado líquido o sólido suspendidas en el aire que pueden generar efectos negativos en la calidad del aire, y no es el único problema que puede causar; entre ellos tenemos, su afectación a la salud de las personas y su efecto sobre la radiación solar, reduciendo la radiación UV, y afectando la transferencia radiativa en la atmósfera de la Tierra (Kumharn et al., 2012; De Bock et al., 2014).

La presencia de estas partículas, repercute sobre el ambiente, el clima y la salud. Además, su estudio permite la retroalimentación de los modelos climáticos que simulan los climas del futuro. Por ello, realizar la caracterización de los aerosoles, estudiar sus propiedades químicas y físicas, identificar las fuentes de emisión, y entender los procesos en los cuales interactúan son tareas de vital importancia, pero de gran complejidad de estudiar debido a la variedad de sus fuentes, la variabilidad en el tiempo y espacio de las propiedades de las partículas tanto a nivel local, regional y global. EPor tal motivo, el estudio de los aerosoles es uno de los campos más activos actualmente.

1.2. Estado del arte

La comunidad científica, a través del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) realiza una evaluación de la literatura científica y técnica emitiendo informes después de cada reunión. Es así, que en el año 1990 posteriormente a su primera reunión, concluyeron que si mantenía el nivel de emisiones de gases de efecto invernadero se podría esperar un incremento de 0.3°C por cada diez años durante el siglo

siguiente (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, 1992). Por consiguiente, la principal función del IPCC es publicar información sobre los temas relevantes a los que se debe aplicar medidas en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) sobre los cambios que se suscitan en el clima terrestre producidos por los gases de efecto invernadero y las partículas o gotas microscópicas presentes en el aire llamadas aerosoles (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, 1995).

¿Y por qué la comunidad científica se interesa en los aerosoles? Los aerosoles son partículas con un diámetro muy pequeño y que pueden ser sólidas y líquidas que están suspendidas dentro de la atmósfera terrestre. Según el 3er informe de evaluación del Cambio Climático los aerosoles intervienen en el balance radiativo Sol-Tierra produciendo un efecto negativo del forzamiento radiativo lo que da a entender que enfrían la superficie terrestre (Panel Intergubernamental del Cambio Climático, 2001). Con el fin de comprender los cambios climáticos es necesario caracterizar los agentes que lo producen, tal es el caso de las erupciones volcánicas que contribuyen una gran inyección de aerosoles en la estratósfera pudiendo enfriar el clima durante algunos años. Un ejemplo de ello, fue la erupción producida por el volcán Chichón, en México en 1982, que inyectó 7 millones de toneladas (Mt) de SO₂ en la estratósfera y el caso del volcán Monte Pinatubo, en 1991, en Filipinas produjo la inyección de más de 20 Mt de dióxido de azufre a la estratósfera generando un enfriamiento global en ambos casos experimentando bruscos descensos tras las erupciones. Asimismo, los aerosoles que encontramos en nuestra atmósfera tienen diferentes orígenes como son los incendios forestales, emisiones de vehículos, contaminación industrial, entre otros.

Es a comienzo de la década de los 90, que los investigadores empiezan a considerar a los aerosoles atmosféricos en los estudios de la predicción del clima. Es entonces que la NASA decide lanzar al satélite TERRA en 1999 y a AQUA el 2002 los cuales llevaban a bordo el sensor MODIS (espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada) con el objetivo de obtener información sobre los aerosoles atmosféricos y otras variables de la atmósfera (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio , s.f.). Sin embargo, la atmósfera seguía interfiriendo. Los satélites no detectaban correctamente debido a la gran cantidad de aerosoles presentes que oscurecían la vista. Es este el motivo, que llevo a los investigadores de la NASA a establecer una Red colaboradora de sensores, fotómetros solares, llamada AERONET (Aerosol Robotic Network) que

permitía validar la precisión de los instrumentos satelitales de una forma lógica para llenar los vacíos en el conocimiento (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio, 2009). Por consiguiente, los investigadores con la finalidad de validar los datos estimados por el sensor MODIS que está abordo de los satélites AQUA y TERRA se realizan comparaciones de las mediciones tomadas en tierra, por medio del fotómetro solar, y los sensores remotos. Tal es el caso del estudio “Comparación de la profundidad óptica de aerosol de MODIS y AERONET en China” que consistió en comparar las estadísticas temporales de AERONET y las estadísticas espaciales de MODIS, utilizando una ventana de 30 km x 30 km para 13 Sitios AERONET en tres longitudes de onda (0.47, 0.55 y 0.66 μm) tanto diario como mensual. Los datos AOD diarios y mensuales emparejados fueron comparados con MODIS obteniéndose los coeficientes de correlación (R) de regresiones lineales para analizar precisión y fuentes de error. Finalmente, para los datos diarios los coeficientes de correlación para las longitudes de onda de 0.47, 0.55 y 0.66 μm presentaron una correlación positiva buena de 0.83, 0.81 y 0.79 para los tres casos respectivamente, mientras que para el estudio de los datos mensuales la correlación fue de 0.7 para todos los casos. Sin embargo, para la evaluación de datos diarios los sesgos sistemáticos en las recuperaciones de MODIS son probablemente debido a los supuestos del modelo de aerosoles y la contaminación de las nubes. Estimaciones pobres en reflectancia superficial y el método MVC (compuesto de valor máximo) para generar conjuntos de datos diarios son probables fuentes de error de gran desplazamiento positivo. Además, las recuperaciones diarias de MODIS AOD mostraron sobreestimación significativa (60%) en condiciones extremas de aerosol, por ejemplo. bajo el polvo eventos o neblina urbana / industrial pesada (Li, Yuan, Feng, & Tao, 2009).

De igual manera, en el estudio “*Variaciones espaciales y temporales del espesor óptico del aerosol atmosférico en el noroeste de México*” realizado por (Llamas, Bonifaz, Valdés, Riveros-Rosas, & Leyva Contreras, 2013) que consistió en el estudio del espesor óptico procedente del sensor remoto MODIS; no obstante, antes de utilizar la información debe validarse con las mediciones tomadas en tierra por los fotómetros solares pertenecientes a la Red AERONET. Es entonces, que se obtiene una correlación $R^2 = 0.891$ lo que indica que los datos son confiables para sus propósitos y útiles para identificar patrones temporales y espaciales en el comportamiento del espesor óptico (AOD). Observándose que los valores más altos de AOD se dan durante la temporada

de lluvias. La relación entre estos valores se puede asociar con presiones atmosféricas bajas debido a las altas temperaturas, que provocan la convergencia de las masas de aire relacionadas con el invierno de América del Norte. Además de la influencia de la forma fisiográfica de la península de Baja California y la isla de la Región noroeste de México en los valores de AOD, la presencia de grandes áreas con escasa vegetación ayuda a estimular la emisión de partículas del suelo. De la misma manera, las áreas de vegetación de alta densidad aumentan la emisión de biomasa en las cordilleras ubicadas en la parte oriental de Sonora.

Del mismo modo, la instalación de fotómetros solares dio lugar a varios investigadores a estudiar las propiedades de los aerosoles; tal es el caso del estudio “Espesor óptico de aerosoles durante el año 2002 para diez estaciones pertenecientes a la red AERONET – NASA” que analiza la evolución del AOD durante todo el año 2002 de 10 estaciones AERONET y a partir del análisis del AOD a 440nm y el coeficiente de angstrom determina los tipos de aerosoles que están presentes en cada estación y que tomando en consideración su ubicación y el entorno que circunscribe a cada estación se puede identificar los tipos de aerosoles presentes. Predominando en las estaciones de CEILAP-BA, Córdova-CETT, Alta Floresta, Arica, GSFC, El Arenosillo, Solar Village, Dahkla el aerosol de tipo continental, y para la estación del Puerto Madryn se identificó la presencia de aerosoles marinos, antárticos y mezcla entre aerosoles de origen polvo sales, industrial y arena, mientras que para la estación México City, por caracterizarse por su alto tránsito vehicular se identificó la presencia de aerosoles de tipo Urbanos/Industriales antárticos (Otero, Ristori, Holben, & Quel, 2006). Reflejándose así, un gran avance científico en la comprensión de los aerosoles atmosféricos.

En el presente año (Scagliotti & Jorge, 2020), presentó el trabajo “*Análisis de un año de mediciones con fotómetro solar en el noroeste del conurbano bonaerense*” específicamente el campus de la Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS) en Los Polvorines. El cual consistió en analizar las mediciones de un año y corroborar los cálculos de AOD a partir de la ley de Lambert-Beer. Se tomó el canal azul (465 nm) y se realizó un histograma de los valores de AOD se concluye que los valores registrados están asociados a una atmósfera limpia. Además, se identificó un ciclo estacional típico en la que los valores más altos de AOD se presentan en primavera y verano. En cuanto al análisis de la distribución del parámetro de Ångstrom determinados confirman los resultados de una atmósfera limpia sin entrada de contaminantes con aerosoles finos.

En cuanto a los tipos de aerosoles identificados existe una ligera predominancia del grupo Continental Limpio frente al de tipo Continental Promedio.

1.3. Descripción del problema

En el año 2001 se identificaron 13 zonas de atención prioritaria con problemas de contaminación del aire debido a su densidad poblacional y a su desarrollo intensivo de actividades socioeconómicas (Ministerio del Ambiente, 2001). En el 2012, a causa de la situación que atravesaba la cuenca atmosférica se sumaron 18 zonas más; siendo en total 31 zonas, entre ellas la ciudad de Huancayo, provincia del departamento de Junín (Ministerio del Ambiente, 2012). Por este motivo, se decidió establecer un Grupo de Estudio Técnico Ambiental de la Calidad del Aire (GT-Gesta Zonal de Aire) en la ciudad de Huancayo con el objetivo de elaborar el Plan de Acción para mejorar la Calidad de Aire en dicha ciudad (Ministerio del Ambiente, 2015).

La práctica más frecuente en el Valle del Mantaro es la quema de biomasa, ya que existe la creencia errónea de los agricultores de quemar los desechos de las cosechas para fertilizar el terreno (Instituto Geofísico del Perú, 2019). No obstante, este hecho además de eliminar los nutrientes del suelo trae consigo la generación de gran cantidad de partículas y gases (Alonso-Blanco, Calvo, Fraile, & Castro, 2012). Esto sumado a la influencia de la cantidad de incendios registrados en Brasil que son transportados por la línea de corrientes de aire hasta Huancayo (Carrillo & Marin, 2007, pág. 18). Finalmente, en el casco urbano el parque automotor, el polvo de las carreteras, la construcción y las actividades industriales son principalmente las fuentes de generación de aerosoles atmosféricos. Además, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2005) refiere que la quema de biomasa son la principal fuente de contaminación atmosférica por partículas finas (PM_{2.5}), pero la DIGESA (Dirección General de Salud Ambiental, 2006) afirma que la fuente principal de contaminación de la provincia de Huancayo es aportada por los vehículos con la emisión de 769 Ton/año de partículas totales en suspensión y aproximadamente el 95% corresponden a partículas con diámetro menor a 10 μm .

Ya en el año 2016, el casco urbano de la provincia de Huancayo, tenía una flota de 61,504 mil vehículos, lo que venía comprometiendo perjudicialmente la calidad del aire de la ciudad (Municipalidad Provincial de Huancayo, 2016). Si bien, la contaminación atmosférica por partículas en una ciudad puede deberse a las fuentes localizadas como

zonas industriales y vehículos motorizados; es preciso darle la importancia a las fuentes externas, que son las que proyectan aerosoles a largas distancias, y a las condiciones climatológicas de la zona que intervienen en la dispersión de los contaminantes (Préndez *et al.*, 1991). Como es el caso de estudio de Carrillo *et al.*, (2007) refieren que la calidad del aire de los meses de agosto, septiembre y octubre de la provincia de Huancayo es influenciada por la quema de vegetación en Brasil encontrándose a un nivel medio de contaminación por aerosoles atmosféricos.

Por último, la exposición a material particulado inhalable puede generar un aumento de la mortalidad debido a problemas respiratorios (Houthuijs *et al.*, 2001). Asimismo, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) afirmó que la exposición a partículas finas (diámetro aerodinámico de partículas menores a 2,5 micrones), tanto en zonas urbanas como en zonas rurales, provocó 4,2 millones de muertes al año prematuras a nivel mundial; causadas por el desarrollo de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, y cáncer. Entre los grupos más sensibles a enfermedades respiratorias pueden estar expuestos a mayor riesgo los niños y los ancianos (Zhu *et al.*, 2018).

Es entonces, que dentro de las limitantes que presentaba la región era la falta de instrumentos y equipo de medición que permitan cuantificar y evaluar los efectos en la atmósfera (Suarez L. , 2015). Por tal motivo, en el año 2015 en el marco del convenio de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) con el Instituto Geofísico del Perú (IGP) se instaló un fotómetro solar que mida los aerosoles atmosféricos (Instituto Geofísico del Perú, 2015) o llamados también partículas suspendidas, que en realidad son una mezcla de partículas microscópicas sólidas o líquidas que van desde 0.005 hasta los 100 μm , y que en función a su tamaño y composición se puede precisar su comportamiento, duración en la atmósfera y sus impactos potenciales al ambiente y la salud (Rojas *et al.*, 2003). Los aerosoles permanecen suspendidos en la atmósfera, influyendo directamente o indirectamente en el forzamiento radiativo, efecto directo; absorbiendo o dispersando la radiación solar, e impacto indirecto; en el que las partículas de aerosoles actúan como núcleos de condensación en la formación de las nubes que modifican sus propiedades ópticas y su tiempo de vida (Piñas, 2015).

La caracterización de la variación temporal de la contaminación por aerosoles es fundamental para un completo entendimiento del comportamiento, transporte y

distribución de los aerosoles atmosféricos. Este estudio permitirá estudiar el comportamiento temporal del espesor óptico y la distribución del tamaño de las partículas de aerosol atmosférico presentes en Huancayo.

1.4. Formulación del problema

1.4.1. Problema general

- ¿Cómo es la variación temporal del espesor óptico y la distribución del tamaño del aerosol atmosférico presente en la ciudad de Huancayo en el año 2016?

1.4.2. Problemas específicos

- ¿Existe correlación entre el espesor óptico del aerosol medido por el sensor MODIS y el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016?
- ¿Cómo es la variación temporal del espesor óptico de los aerosoles medidos con el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016?
- ¿Cómo es la distribución del tamaño de los aerosoles atmosféricos medidos con el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Analizar la variación temporal del espesor óptico y la distribución del tamaño del aerosol atmosférico presente en la ciudad de Huancayo en el año 2016.

1.5.2. Objetivos específicos

- Realizar el análisis de correlación entre el espesor óptico del aerosol medido con el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016.
- Analizar la variación temporal del espesor óptico de los aerosoles medidos con el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016.
- Analizar la distribución del tamaño de los aerosoles atmosféricos medidos con el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016.

1.6. Justificación

La presencia de partículas en la atmósfera tiene importante intervención en ambiente, el clima y la salud. La exposición a elevadas concentraciones, durante periodos cortos, no genera efectos agudos. Sin embargo, los impactos sobre la salud de las personas por la exposición a altos niveles de concentración se dan en un tiempo considerable e influyen principalmente sobre la salud cardiopulmonar, el incremento de la tasa de mortalidad y la disminución de la esperanza de vida (Salcedo, 2007). Por esta razón, es necesario que la urbe de la provincia de Huancayo conozca el nivel de contaminación a los que está expuesto y el comportamiento de los aerosoles a través del tiempo.

Este estudio tiene como finalidad comprender la variación temporal de la profundidad óptica de los aerosoles atmosféricos (AOD) para el año 2016. Para alcanzar estos objetivos, utilizaremos los siguientes datos: el AOD medidos por el Sensor MODIS, el Fotómetro solar CIMEL de la Red AERONET y el diámetro de las partículas obtenidas por medio de los datos recuperados por el fotómetro solar.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

(Obregón, 2012), en el estudio que realizó sobre los aerosoles que están presentes en la columna atmosférica por medio de medidas radiométricas, en la Universidad de Extremadura ubicada en la ciudad de Extremadura, España. Este estudio consistió en caracterizar los aerosoles presentes en la columna atmosférica sobre la estación Cáceres a partir del análisis de la data obtenida por el fotómetro solar que pertenece a la red AERONET instalado en la Universidad por un periodo de 6 años desde julio 2005 a julio del 2011. Parte del estudio fue realizar un análisis de otros parámetros como es el espesor óptico, parámetro de Angstrom, parámetro de asimetría, distribución de tamaños de partículas en volumen y la concentración de tamaños en volumen. Como resultado del análisis de la distribución de tamaños de partículas en volumen, que es de esencial interés para esta investigación, se concluyó lo siguiente:

- Se identificó dos modos bien diferenciados, uno de ellos de partículas de tamaño cercano a $0.1 \mu\text{m}$ (partículas finas), y otro de partículas gruesas de tamaño de alrededor de $5 \mu\text{m}$.
- Los meses en los que se presentó elevados volúmenes de aerosol guardan relación con los meses de valores altos de espesor óptico.
- En la época de invierno las partículas finas predominan a las gruesas debido a que durante esta época la deposición húmeda es mayor, lo que provoca que las partículas gruesas no permanezcan en suspensión.

(Llorente, 2017), que evaluó la variabilidad espacio - temporal del AOD a partir de observaciones satelitales, en la Universidad Nacional de Colombia. Este estudio consistió en analizar la profundidad óptica del aerosol (AOD) sobre 4 regiones de la ciudad de Colombia (Medellín, Puerto Gaitán, Bogotá y la Zona Carbonífera del Cesar) desde el año 2012 hasta el 2015. La información fue adquirida en el espacio web de la NASA obtenidos por MODIS Dark Target de la plataforma Aqua; y validados con los

datos de Nivel 2.0 de los fotómetros solares pertenecientes a la red AERONET ubicados en cada una de las ciudades estudiadas. Adicionalmente, se estudió la variación temporal y la distribución espacial de la profundidad óptica de aerosoles en la Zona Carbonífera del Cesar (ZCC) en comparación con la zona no minera. Como resultado de la investigación se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se determinó una relación significativa entre el AOD por MODIS y el AOD de AERONET para las ciudades de Medellín, Puerto Gaitán y la ZCC; y una correlación más baja para la ciudad de Bogotá debido a la alta nubosidad presente y a una corta campaña de monitoreo. Además, se encontró una sobreestimación de los valores de AOD de MODIS de alrededor del 21%, 37% y 77% en las ciudades de Medellín, Puerto Gaitán y la ZCC respectivamente, lo cual se debió a la contaminación por nubes y a la reflectancia de la superficie.
- Los análisis del AOD de MODIS en la zona minera estuvieron entre 0.094 y 0.522 y en la zona no minera entre 0.095 y 0.828, demostrando que no existen diferencias muy marcadas del AOD de ambas zonas. De donde se infiere que el contenido de aerosoles mantiene un comportamiento y magnitud parecidos, puesto que los aerosoles fueron transportados y dispersados en base a sus características físicas (tamaño y forma) y las condiciones meteorológicas.

(Núñez Romero, 2017) que realizó la investigación sobre la Caracterización del espesor óptico diurna, mensual y estacional de aerosoles para el periodo marzo-2015 hasta julio-2016 en la facultad de Ingeniería de la Universidad Continental. Este estudio consistió en evaluar el espesor óptico del aerosol (AOD) procedente de la Red AERONET, el cual concluye:

- A finales del mes de julio se presenta un aumento en los medios diarios del AOD. Los máximos valores se obtienen en el mes de septiembre y el mínimo en diciembre.
- El comportamiento estacional del AOD muestra bajas concentraciones para otoño y verano. Por el contrario, las estaciones de invierno y primavera son considerados los de elevada carga.
- Según las medias mensuales del AOD, se identificaron aerosoles de tipo marítimo y continental durante todo el periodo estudiado. Mientras que desde el mes de julio hasta noviembre se presentan aerosoles de quema de biomasa.

(Angeles, 2019), presentó la investigación sobre el Efecto de las propiedades físicas de los aerosoles en el equilibrio energético en la facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Centro del Perú. Este estudio consistió en realizar un análisis temporal del espesor óptico del aerosol a una longitud de onda de 440 y 500 nm, el coeficiente de angstrom, albedo scattering single, la distribución de tamaño, el forzamiento radiativo directo, la influencia de las masas de aire sobre los aerosoles atmosféricos y la del espesor óptico de aerosol sobre la tasa de calentamiento. Donde sus principales resultados fueron:

- La variación temporal del AOD del año 2015 y 2016 a una longitud de onda de 440 nm presentó valores máximos entre 2 a 2.5. Para el caso de la longitud de onda de 500 nm también se obtuvo persistencia de la ocurrencia de elevados valores.
- El exponente de angstrom llega muy cerca del valor 2, mientras que el espesor óptico de aerosol aumenta paulatinamente, indicando preponderancia de los aerosoles de la moda fina.
- Tanto en la estación seca como lluviosa se obtuvo partículas de moda fina y gruesa.
- El análisis de transporte de contaminantes con HYSPLIT indica que del 10 al 15 de setiembre del 2015 para Huancayo hubo un desplazamiento de masas de aire emitido directamente de la zona amazónica debido a la quema de vegetación de la zona.

Por último, (Estevan, Martínez Castro, Suarez Salas, Moya, & Silva, 2019) presentaron el estudio sobre las mediciones de aerosoles donde se estudiaron las mediciones del fotómetro solar desde marzo de 2015 hasta agosto de 2017 concluyéndose que los valores más altos del espesor óptico del aerosol (AOD) se presentan en el mes de septiembre, se identificaron seis subtipos de aerosoles para el periodo de estudio, los cuales son continentales, urbanos, mixtos, desérticos, marítimos y de biomasa. Predominando los aerosoles de tipo continental y de biomasa. Además, se analizó la distribución del tamaño de aerosol revelándose un carácter bimodal con un ligero predominio del modo fino, el cual fue relacionado con los dos tipos principales de aerosoles: continental y biomasa

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Aerosol atmosférico:

Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2013), los aerosoles son partículas que se encuentran presentes en la atmósfera pudiendo ser sólidas o líquidas y que tienen un rango de tamaños comprendido entre 0.01 hasta 10 μm y que están presentes en la atmósfera por los menos unas horas. Los aerosoles pueden ser de origen natural o antropogénico (**Figura 1**). Además, podrían influir directamente en el clima, dispersando o absorbiendo la radiación, e indirectamente actuando como núcleo de condensación de las nubes influyendo en su formación y periodo de vida.

Los aerosoles influyen en el balance radiativo de la tierra (dispersando o absorbiendo de la radiación solar) y en la formación de las nubes (Eficacia Legal, 2018). Los efectos climáticos son complejos y va a depender de las propiedades fisicoquímicas de los mismos (Della, 2018).

Las propiedades ópticas de los aerosoles están delimitadas por ciertas características que varían en el espacio y el tiempo, tales como; composición, concentración, tamaño, forma, y estructura interna. Los tipos de aerosol se puede identificar según las partículas que lo componen como son los nitratos, sulfatos, partículas biológicas (bacterias y polen), sal marina, hollín y partículas orgánicas según afirmó Kokhanovsky, A, 2008 (citado en Llorente, 2017).

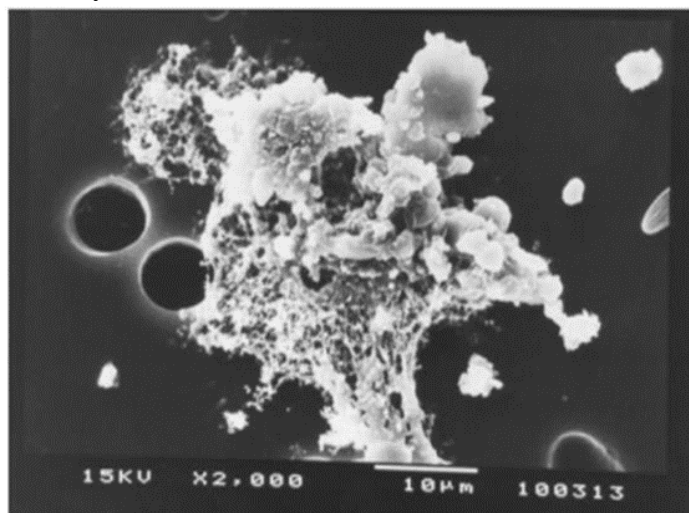


Figura 1. Micrografía de una partícula de aerosol atmosférico compuesta de Aluminio (Al), Silicio (Si) y Calcio (Ca). Recuperado del trabajo Relação entre a profundidade ótica dos aerossóis e a radiação solar incidente em área do cerrado Mato-Grossense (Dutra, 2015).

2.2.2. Tipos de aerosoles

2.2.2.1. Según su fuente

Los aerosoles atmosféricos pueden ser de origen natural o antropogénico y su composición está en función de la fuente generadora (Obregón, 2012). Podrían emitirse directamente a la atmósfera (fuentes primarias) o formarse por reacciones químicas (fuentes secundarias) (Arellano, 2011). Por ello, debido al mecanismo de producción los aerosoles se clasifican en aerosoles primarios y secundarios (Pesantez, 2013) como se describe a continuación:

a) Aerosoles Primarios: Se emiten de manera directa a la atmósfera (Arellano, 2011), son de origen natural y representan el 90% de la masa global. Entre ellos tenemos la sal marina procedente del mar y océano, polvo mineral proveniente del desierto, expulsión de gases y ceniza de los volcanes y la actividad biológica de las regiones forestales (Pesantez, 2013). A escala global, en su mayoría, provienen de fuentes naturales, mientras a una escala local las emisiones de origen antropogénico pueden ser determinantes (Pérez, 2010).

b) Aerosoles secundarios: Se forman por reacciones químicas en la atmósfera (Arellano, 2011), son de origen antropogénico y constituyen el 10% que resta. Proviene principalmente del proceso de combustión, la industria, el humo producido por la quema de biomasa, polvo generado por el pastoreo en exceso, deforestación, y otras actividades de gestión de la tierra (Pesantez, 2013).

2.2.2.2. Según su tamaño

El tamaño de los aerosoles es uno de los principales parámetros que determina el tiempo de permanencia en la atmósfera (**Figura 2**), es por ello que las partículas más grandes se depositan con mayor facilidad por acción de la gravedad. (Obregón, 2012). Adicionalmente, el tamaño de los aerosoles es considerado el principal condicionante del comportamiento del aerosol (Da Cruz Martins, 2011). No obstante, la composición, su capacidad de reacción con otros compuestos, su localización, y las condiciones meteorológicas son parámetros que también influyen en el tiempo de permanencia (Obregón, 2012). Según el libro *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (Seinfeld *et al.*, 1998) las partículas pueden dividirse en:

a) Partículas finas; partículas que presentan un diámetro menor a 2.5 μm , y estos pueden dividirse en dos modos: el modo de aitken y el modo de acumulación. El modo de aitken se extiende desde 0.005 hasta 0.1 μm de diámetro, mientras que el modo de acumulación se extiende desde 0.1 μm hasta 2.5 μm de diámetro (Seinfeld *et al.*, 1998).

El modo de aitken o también llamado modo de nucleación hace referencia a las partículas provenientes de la conversión de gas – partícula y de la condensación del vapor caliente (Da Cruz Martins, 2011). Mientras que el modo de acumulación se basa en partículas que resultan de procesos de coagulación y/o de la condensación de compuestos semivolátiles (Pey, 2007). Cabe mencionar, que las partículas del modo de acumulación también pueden formarse mediante la coagulación de las partículas del modo de aitken, y que debido a su permanencia más prolongada intervienen en la dispersión de la radiación solar (Alegría, 2015).

b) Partículas gruesas; se caracterizan por presentar un diámetro mayor a 2.5 μm (Seinfeld *et al.*, 1998) y menores de 10 μm (Martínez & Rodríguez de Torres, 2000) y se forman por procesos mecánicos que por lo general se componen de partículas antropogénicas y de polvo natural. Estas partículas son descartadas con gran rapidez debido al proceso de sedimentación (Alegría, 2015). Los fenómenos que intervienen en el tamaño de las partículas se muestran en el siguiente esquema:

Según el esquema anterior la deposición de las partículas puede producirse por vía seca o húmeda, la deposición seca se da por acción de la gravedad (sedimentación) mientras la deposición húmeda se da por la acción de la lluvia al favorecer el descenso de las partículas (Obregón, 2012).

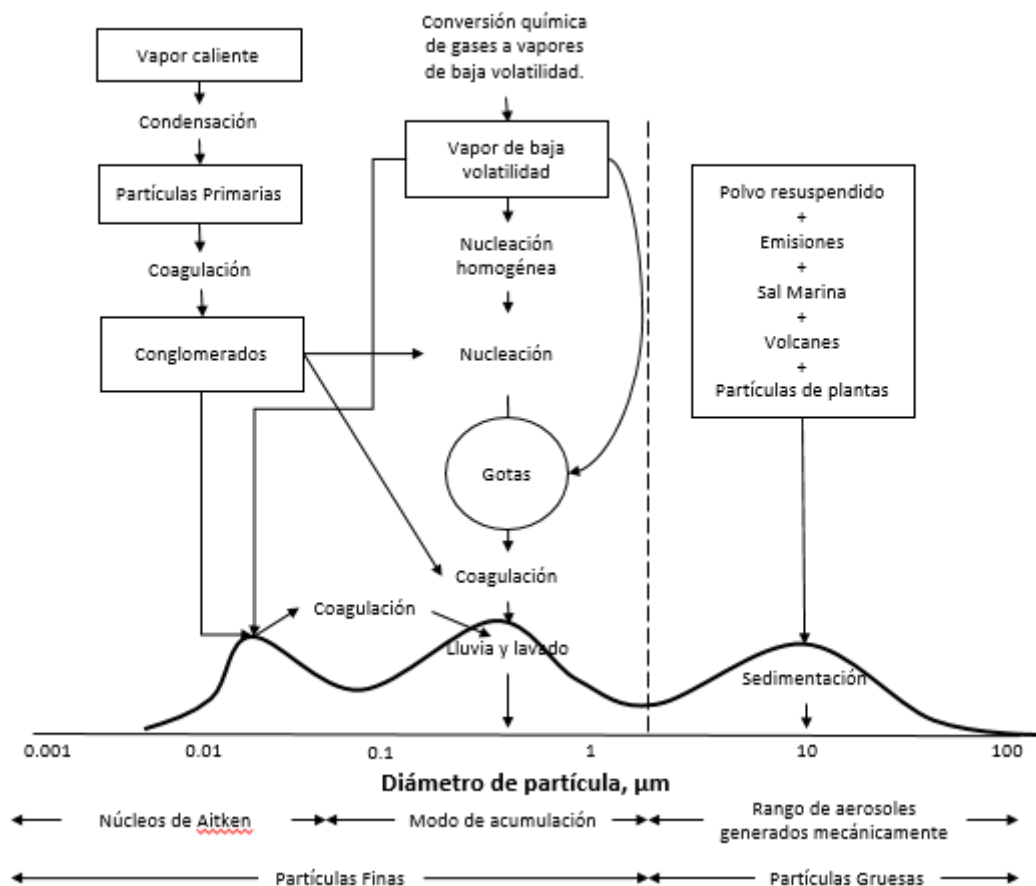


Figura 2. Esquema idealizado de la distribución y procesos que afectan los aerosoles atmosféricos. Se indican los modos principales, las fuentes y los mecanismos de formación y eliminación de partículas. Adaptado por (Seinfeld *et al.*, 1998). Original de (Whitby & Cantrell, 1976).

2.2.2.3. Según su composición

La composición química varía y depende del tipo de material que compone la fuente de emisión (Obregón, 2012). Entre ellos tenemos:

a) **Sales marinas:** se generan durante la evaporación del agua en zonas marítimo – oceánicas.

b) **Compuestos orgánicos:** no se tiene muy claro sus mecanismos de producción, pero se conoce que se producen en las masas forestales.

c) **Minerales:** se pueden generar en el proceso de erosión del suelo y la abrasión de las rocas. Son incorporadas a la atmósfera por acción del viento.

d) Sustancias carbonáceas: son partículas generadas en el proceso de combustión. Entre ellas tenemos la quema de biomasa, actividades industriales y urbanas.

e) Sulfatos: se produce por vía natural, a través de actividad volcánica, flora y organismos marinos, o por vía antropogénica por la quema de combustibles fósiles.

f) Nitratos: se produce a través de reacciones químicas que involucran gases de origen natural como antropogénico.

g) Cenizas volcánicas: estas partículas son emitidas principalmente en la estratósfera y permanecen durante periodos muy prolongados en esta capa. Son producidas como consecuencia de las erupciones volcánicas.

Lo que ocurre en la atmósfera es un agregado de partículas de diferente origen, y conocer la composición es de utilidad para determinar otras propiedades de estas partículas. Las partículas de aerosol resultan de diferentes fuentes y procesos, y sus componentes pueden mezclarse externamente para clasificar a los aerosoles (Hess *et al.*, 1998), los cuales según su naturaleza de las partículas se clasifican en los siguientes grupos según Seinfeld *et al.*, 1998 (como citó Pérez, 2010) se definen los siguientes tipos:

a) Aerosol Mineral: estas partículas son de origen primario, y se producen debido a la erosión terrestre (desgaste del suelo y rocas presentes en la corteza terrestre) y son introducidas en la atmósfera por acción del viento y el comportamiento de la temperatura con la altitud (gradiente vertical de la temperatura) (Pérez, 2010). Los principales constituyentes son; cuarzo, carbonatos, minerales de arcilla, cloritas, feldespatos, sulfatos, fosfatos y óxidos de hierro. Es posible que la composición química de los aerosoles varíe en las diferentes zonas, va a depender básicamente de las condiciones del suelo (Pey, 2007).

b) Aerosol Marino: debido a la gran cantidad de masa oceánica existente, 2/3 de la superficie terrestre, los aerosoles marítimos son los más abundantes en la atmósfera. Están formados por sustancias que son solubles en agua y partículas de origen salino (Obregón, 2012). Las partículas de aerosol de mar se producen en la

superficie del mar mediante explosiones de burbujas provocadas principalmente por las olas rompientes (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013). Se generan en ambientes marino-oceánicos y las partículas están compuestas básicamente de cloruro sódico, pero también encontramos otras formas de cloruros y sulfatos (Pérez, 2010).

c) Aerosol carbonoso: A nivel mundial, este tipo de aerosol es de mucha importancia en la quema biomasa. Están compuestas principalmente de carbono (C) y pueden ser de origen natural o antropogénico (Pérez, 2010). Estos aerosoles contienen un gran número de especies orgánicas. No obstante, se ha comprobado la presencia de hidrocarburos (dibenzodioxinas y furanos policlorados) (Espen *et al.*, 2009)

d) Partículas derivadas de Sulfatos: Son partículas derivadas del azufre, y cuyo componente principal es el azufre (Pey, 2007). Estas partículas pueden ser de origen natural, aunque fundamentalmente son partículas de origen secundario ya que son formadas por medio de oxidación de otras partículas que ya estaban presentes en la atmósfera como es el caso del dióxido de azufre (SO₂) (Pérez, 2010).

e) Partículas derivadas de Nitratos: está compuesto por nitrógeno (N₂), y en su mayoría son partículas secundarias emitidas por fuentes de origen natural y antrópico (derivadas de la combustión de los combustibles fósiles, biomasa, agricultura y ganadería) (Pey, 2007).

2.2.3. Propiedades de los aerosoles

Estas partículas presentan variaciones físicas y químicas al tiempo que están suspendidas, y que para realizar una caracterización es necesario conocer sus propiedades, como; su origen, concentración, distribución en el espacio y tiempo, y su dinamismo global (Pesantez, 2013).

2.2.3.1. Propiedades Físicas:

Las propiedades físicas de estas partículas quedan caracterizadas en función de su forma, distribución del tamaño y su índice de refracción (Pérez, 2010).

a) Forma: Las partículas que componen los aerosoles atmosféricos pueden tener forma muy variada (Pérez, 2010). Pero, debido que es muy complejo realizar un

análisis de dispersión de partículas que no son de forma esférica, se les consideran como partículas de forma esféricas (Pesantez, 2013). Sin embargo, esta teoría tiene validez solo para partículas marino-oceánicas (partículas higroscópicas) o las que derivan del carbono de tamaño pequeño, pero no se aplica para partículas de tipo polvo o núcleos de condensación (Esteve, 2011).

b) Distribución de tamaño: La distribución de tamaños indica la cantidad, volumen, masa o superficie total de partículas en función del diámetro aerodinámico, expresado en términos de concentración, es decir, que la cantidad, volumen, masa, o superficie de las partículas por unidad de volumen de aire por tamaño de partículas (Escribano, 2012).

Según Esteve (2011), para estudiar el tamaño de los aerosoles se debe considerar a todos ellos en conjunto, de manera que su tamaño que es determinado por su “ r ” es representado por la función de distribución de tamaños $n(r)$ establecida por:

$$n(r) = \frac{dN}{d \ln r}$$

Representando la cantidad de partículas por unidad de volumen en una columna atmosférica de sección de unidad.

Donde:

N: Número total de partículas en la columna completa

Y se obtiene integrando:

$$N = \int_0^{\infty} n(r) d \ln r$$

Del mismo modo, se puede definir la distribución de superficie $s(r)$ y volumen $v(r)$, a partir de la distribución de tamaños:

$$s(r) = \frac{dS}{d \ln r} = 4\pi r^2 \frac{dN}{d \ln r}$$

$$v(r) = \frac{dV}{d \ln r} = \frac{4}{3}\pi r^3 \frac{dN}{d \ln r}$$

No obstante, en particular se emplea la distribución de volumen debido a que esta tiene la particularidad de mostrar al mismo tiempo los modos de acumulación y grueso de forma adecuada.

La distribución de tamaños (**Figura 3**) es una de las propiedades relevantes en determinar y clasificar los aerosoles que están suspendidos en la atmósfera (Pesantez, 2013). Pues, el tamaño de las partículas determina no solo la fuente de las partículas, sino también los efectos sobre la visibilidad, el clima, la salud (Martínez J. A., 2011), el tiempo de residencia atmosférica (Mas, 2017) y sus propiedades físicas y químicas (Rojas, 2014). Adicionalmente, existen varias fuentes bibliográficas que describen la distribución de tamaños de los aerosoles atmosféricos. Entre ellas tenemos la distribución de Junge (1952), la distribución de Gamma (Hansen, 1971; Hansen & Travis, 1974) y la distribución Log Normal (Davies, 1974) que es la más usada por su facilidad para describir adecuadamente la distribución de los tamaños en función de sus componentes, e inferir la naturaleza de sus fuentes. Como se mencionó anteriormente una gran cantidad de partículas no presentan una forma esférica; sin embargo, los diámetros son considerados como una esfera con el mismo comportamiento físico (Delgado, 2001).

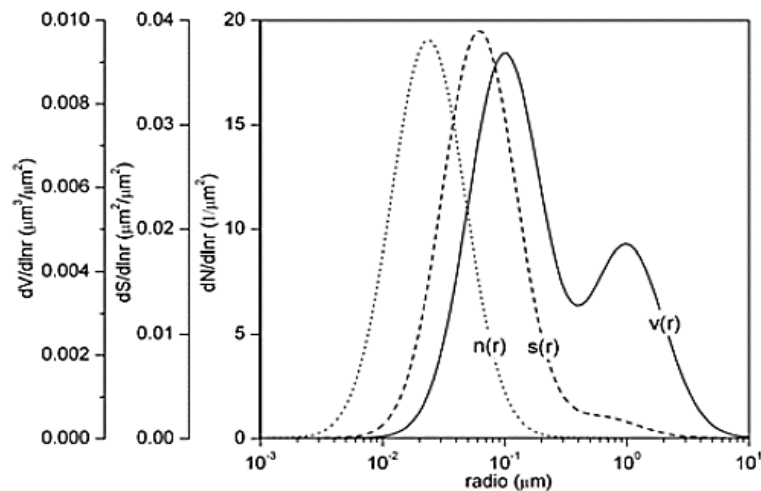


Figura 3. Distribución de tamaños expresada en número $n(r)$, superficie $s(r)$ y volumen $v(r)$. Recuperado del trabajo Estudio de los aerosoles atmosféricos en valencia mediante medidas del Nefelómetro de integración (Esteve, 2011).

Por otro lado, la distribución suele presentarse en tres diferentes modos (moda de nucleación, moda de acumulación y moda gruesa) (Rojas, 2014). No obstante, debido a la dificultad para identificarlos las partículas se agrupan en dos grandes grupos que son: partículas finas (diámetro aerodinámico <2.5 µm) (Delgado, 2001) y partículas gruesas con un diámetro comprendido que va desde 2.5 a 10 µm (Martínez & Rodríguez de Torres, 2000).

Tabla 1

Tipos de partículas según su radio

Tipo de partículas	Radio
Partículas finas	De radio menor a 2.5 µm
Partículas gruesas	De radio mayor de 2.5 µm y menos a 10 µm

Fuente. Delgado (2011).

c) **Índice de refracción:** Este parámetro está ligado a la composición química de los aerosoles atmosféricos y va a depender principalmente de su composición el absorber o dispersar la radiación incidente en la atmósfera (Oraá, 2018).

2.2.3.2. *Propiedades ópticas:*

a) **Espesor óptico del aerosol (AOD):** Se define como una medida adimensional (Calderón, 2018), de la extinción de la irradiancia solar que llega a la superficie debido a la dispersión o absorción (Cortés *et al.*, 2014). En otras palabras, indica el nivel en que los aerosoles impiden la transferencia de luz en toda la columna atmosférica debido a partículas en suspensión presentes (Llorente, 2017) o la cantidad de partículas suspendidas en la atmósfera (Toledano, 2005).

Según la Ley de Beer- Bouguer- Lambert viene dado por:

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

Donde:

I: Irradiancia a nivel del suelo

I_o : Irradiancia extraterrestre

τ : Espesor óptico total de la atmósfera

m : masa óptica

Entonces, para determinar el espesor óptico del aerosol (τ_a), es necesario restar al espesor total de la atmósfera (τ) el scattering Rayleigh (τ_R) y la absorción por otros gases (τ_g):

$$\tau_a = \tau - \tau_R - \tau_g$$

El espesor óptico del aerosol (AOD), es un parámetro importante para estudiar las propiedades de los aerosoles y a partir de la teoría de Mie es posible aplicar la metodología de algoritmos de inversión para la obtención de la distribución de los tamaños de estas partículas (Toledano, 2005).

El AOD es obtenido mediante de las mediciones en tierra por los fotómetros solares que son administrados por la Red AERONET y por el sensor remoto (MODIS) a bordo de los satélites AQUA y TERRA. Para poder ser comparables se debe seleccionar los datos tomados por el fotómetro coincidentes con un segmento de datos dentro de la media hora del paso del satélite. Además, el espesor óptico del aerosol medido por AERONET es medido a una longitud de onda diferente a la del sensor MODIS; por ello, es preciso interpolar los datos del AOD a una misma longitud de onda para poder realizar una correlación (Soledad *et al*, 2018). Adicionalmente, para realizar la validación se debe interpolar el AOD de AERONET a una longitud de onda común (550 nm) utilizando la ley de potencia bajo la siguiente ecuación:

$$AOD_{550\text{ nm}} = AOD_{500\text{ nm}} \left(\frac{550}{500}\right)^{-\alpha}$$

Donde α es el exponente de Angstrom (440–870 nm) obtenido de las mediciones de AERONET (Prasad & Singh, 2007).

b) Coeficiente de Angstrom (α): Es un parámetro adimensional que define la forma espectral del AOD. En otras palabras, depende de la longitud de onda a un cierto rango espectral (Toledano, 2005). Se puede definir:

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

Donde:

λ : Longitud de onda en μm

α : Parámetro de Angstrom

β : constante que coincide con el espesor óptico correspondiente a $1 \mu\text{m}$

Este parámetro puede ser utilizado para distinguir las partículas según su tamaño (Burgos, 2016). En teoría α toma valores entre 0 y 4. El valor más bajo está asociado con partículas grandes, mientras que las partículas pequeñas con valores más altos de α . El alfa de los aerosoles se encuentra entre 0 y 2.5 (Toledano, 2005).

Adicionalmente, según Buseck & Schwartz (2013) citado en (Palacios, 2014) los siguientes parámetros son considerados propiedades ópticas de los aerosoles:

c) **Coefficiente de dispersión:** Fracción de luz incidente que se dispersa por acción de los aerosoles por unidad de longitud recorrida por unidad de longitud.

d) **Coefficiente de absorción:** Fracción de luz incidente absorbida por las partículas por unidad de longitud recorrida por el haz de luz.

e) **Coefficiente de extinción:** Se representa por la suma de los coeficientes de dispersión y absorción. Teóricamente, es la luz es absorbida o dispersada por los aerosoles provocando atenuación de la misma. En otras palabras, el nivel de la irradiancia solar se debilita al atravesar un espesor de aerosoles.

2.2.3.3. *Propiedades químicas:*

Esta propiedad tiene importancia para evaluar el daño que estas pueden llegar a producir (Préndez *et al.*, 1991).

2.2.4. Instrumentos de medición de aerosoles atmosféricos

2.2.4.1. *Medición de aerosoles a nivel de superficie*

Existen diversas metodologías y varios instrumentos enfocados en obtener información sobre los aerosoles atmosféricos, evaluar su variabilidad en el tiempo, manifestar las fuentes de emisión y diversos procesos de transporte que se propician gracias a las condiciones meteorológicas (Burgos, 2016).

2.2.4.1.1. Red AERONET.

AERONET (Aerosol Robotic Network) empezó en 1998 y es una federación establecida por la Administración Nacional de la Aeronáutica del Espacio y la Red de Fotometría para el procesamiento operacional de la normalización satelital (PHOTONS, por sus siglas en francés) que está conformada por una red de fotómetros solares que estudian las propiedades ópticas y validan los datos obtenidos por los satélites. Actualmente, esta red cuenta con alrededor de 1000 estaciones distribuidas en distintas partes del mundo y su finalidad es proporcionar información del AOD, vapor de agua y variables radiativas y microfísicas que se obtienen a través de algoritmos de inversión (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, 2000).

AERONET proporciona en la web (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) los datos del espesor del óptico (AOD) en 3 diferentes niveles de acuerdo a su calidad. El nivel 1.0 son datos crudos sin calibración o procesamiento, el nivel 1.5; información con un procesamiento por medio de algoritmos donde se retiraron las nubes, el nivel 2.0; son medidas de mayor calidad, sin nubosidad y con una calibración del aparato después de un periodo de mediciones en la estación (12 meses).

Las mediciones de AERONET (**Figura 4**) son consideradas verídicas a nivel del suelo y se utilizan para validar datos obtenidos por los satélites (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, 2000).



Figura 4. Estaciones de la Red AERONET a nivel mundial. Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA). Recuperado de la web de AERONET <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>

El Fotómetro solar CIMEL CE-318, está diseñado para tomar mediciones ópticas multibandas para obtener información fibra-óptica de los aerosoles atmosféricos (Calderón, 2018). En otras palabras, realiza mediciones automáticas de la irradiancia solar directa en intervalos de 15 minutos y mediante estas medidas que es posible obtener el AOD y el vapor de agua. Este instrumento realiza medidas a diferentes longitudes de onda como 340, 380, 440, 670, 870, 1020 nm y el canal 940 nm para determinar la cantidad total de vapor de agua precipitable mediante filtros interferenciales que van en una rueda de filtros la cual presenta 9 posiciones (Piñas, 2015). Este último, es estudiado debido a su interrelación con los aerosoles, por la intervención de la humedad de las masas de aire sobre el crecimiento y la modificación de las propiedades ópticas (scattering albedo) y físicas como la distribución de los tamaños, todo esto ligado a la composición química de los mismos y a su capacidad de absorber agua (Ortiz de Galisteo, 2011).

Los datos registrados son almacenados por el fotómetro que luego son enviados al sistema que procesa los datos que pertenece a AERONET satelitalmente o mediante internet a través de un computador (descarga manual) (Obregón, 2012).

El fotómetro solar puede alimentarse de directamente de la energía eléctrica o un panel solar (Obregón, 2012). Principalmente está compuesto de:

- **Unidad de Control:** unidad con el cual se planifica automáticamente el fotómetro solar para sus mediciones.
- **Robot:** está constituido por 2 motores que controlan las coordenadas (acimutal y cenital). Además, este permite que el fotómetro tome mediciones de radiación directa y difusa.
- **Cabeza sensora:** se ubican 2 sensores, fotodiodos de silicio, y realizan mediciones de radiancia directa y difusa.
- **Colimadores:** el fotómetro cuenta con dos tubos limitadores, uno mide radiancia directa y el otro radiancia de cielo, de 33 centímetros que va encima de la cabeza sensora.
- **Sensor de humedad:** este sensor evita que el fotómetro funcione cuando se presenten altos niveles de humedad.

El sistema clasifica los productos obtenidos en 2 grupos:

- **Productos de medidas directas:** son aquellos productos obtenidos de las medidas espectrales a la radiación directa en diferentes longitudes de onda. Entre ellos, se tiene el AOD y el α .
- **Productos de inversión:** son obtenidos mediante la medición de a irradiancia difusa y que mediante el procedimiento de inversión se obtienen la distribución del tamaño de partículas, índice de refracción, albedo de dispersión simple, factor de asimetría y funciones de fase. (Nisperuza, 2015).



Figura 5. Fotómetro solar del Observatorio de Huancayo – Perú. Instituto Geofísico del Perú.

De parte de la red AERONET, el Perú cuenta con el fotómetro solar CIMEL CE-318 ubicado en Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR) del Instituto Geofísico del Perú en el departamento de Junín, Huancayo – Huayao. Esta estación se dio debido al convenio entre la Administración Nacional Aeronáutica del Espacio con el Observatorio de Huancayo del Instituto Geofísico del Perú en el año 2015 (Instituto Geofísico del Perú, 2015).

2.2.4.1.2. Sensor MODIS.

Este sensor está a bordo del satélite Terra o EOS.AM y Aqua o EOS-PM . Ambos pertenecen al Sistema de Observación de la Tierra (EOS) (Rojas, 2014) y tienen el objetivo de adquirir datos que permiten estudiar la dinámica global de la atmósfera, su interacción con la tierra, el océano y atmósfera (Cholan, 2016).

Terra y Aqua presentan una órbita helio-sincrónica y cuasi polar con una inclinación de 98.2° y 98° y una altitud media de 708 y 705 km respectivamente. Ambas plataformas visualizan en su totalidad la superficie terrestre cada 1 o 2 días dependiendo de la latitud (François, 2011).

a) Características generales del satélite TERRA: Terra se encuentra en sincronización con el Sol que la lleva de norte a sur (lado diurno de la tierra) cada 99 minutos. Además, pasa de norte a sur, cruzando el Ecuador, a las 10:30 am en su órbita descendente (François, 2011).

El satélite TERRA lleva consigo cinco instrumentos que toman mediciones coincidentes del sistema de la tierra:

- Radiómetro de Reflexión y Emisión Térmica Avanzado Spaceborne (ASTER)
- Las nubes y el sistema de energía radiante de la Tierra (CERES)
- Espectrorradiómetro de imagen multiángulo (MISR)
- Mediciones de la contaminación en la troposfera (MOPITT)
- Espectrorradiómetro de imagen de resolución moderada (MODIS)

Tabla 2

Características del Satélite TERRA

Características del Satélite TERRA	
Misión	Sistema De Observación De La Tierra (EOS, por sus siglas en inglés)
Institución responsable	NASA
País/Región	Estados Unidos, Japón y Canadá
Satélite	TERRA (EOS-AM1)
Lanzamiento	18/12/1999
Tiempo de duración de órbita	98.1 min
Horario de paso	10:30 am

Fuente. Elaboración propia. Recuperado de (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, s.f.).

b) Características generales del satélite AQUA: Aqua es parte de la misión científica de la NASA (Administración Nacional Aeronáutica del Espacio) y

recopila información sobre el ciclo de agua; evaporación de los océanos, vapor de agua en la atmósfera, nubes, precipitación, humedad del suelo, hielo del mar y la tierra, la cobertura de nieve de la tierra y el hielo. Hace paso de sur a norte sobre el ecuador a las 1:30 pm (François, 2011) y lleva a bordo los siguientes instrumentos:

- Sonda infrarroja atmosférica (AIRS)
- Unidad de sondeo de microondas avanzada (AMSU-A)
- Sonda de humedad para Brasil (HSB)
- Radiómetro de barrido avanzado para EOS (AMSR-E)
- Espectromadiómetro de imagen de resolución moderada (MODIS)
- Nubes y el sistema de energía radiante de la Tierra (CERES)

Tabla 3

Características del Satélite AQUA

Características del Satélite AQUA	
Misión	Sistema De Observación De La Tierra (EOS, por sus siglas en inglés)
Institución responsable	NASA
País/Región	Estados Unidos, Japón y Canadá
Satélite	AQUA (EOS-PM1)
Lanzamiento	04/05/2002
Tiempo de duración de órbita	98.8 min
Horario de paso	1:30 pm

Fuente. Elaboración propia. Recuperado de (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, s.f.).

c) **Productos atmosféricos MODIS:** Según (François, 2011) son divididos en 5 niveles, 0 al 4, en función de su grado de procesamiento que se le realiza:

- **Nivel 0:** datos que no tienen tratamiento.
- **Nivel L1:** datos de geolocalización (MOD03) con coordenadas geodésicas, datos sobre el nivel de elevación del terreno, máscara de tierra /agua, ángulo de elevación, cenit, azimut del satélite y sol.

Nivel 1A: Son los productos que se utilizan para la geolocalización, la calibración y el procesamiento; cuenta con niveles de radiancia (MOD01) de las 36 bandas espectrales.

Nivel 1B: Imagen radiamétrica corregida y calibrada a unidades físicas, tiene radiancia y geolocalización (MOD02) para las bandas que se generan a nivel 1A.

- **Nivel L2:** Productos obtenidos de otros productos L1B a los cuales se le aplican correcciones atmosféricas.

Nivel L2G: se genera con información obtenida por un periodo establecido (12-24), luego se agrupan en cuadrículas de $10^\circ \times 10^\circ$, que contienen variables geofísicas proyectadas en una malla uniforme.

- **Nivel 3:** Son aquellos que derivan de variables geofísicas que se mapean, con resolución temporal de 1, 8, 16 y 30 días. Entre los principales tenemos: aerosoles atmosféricos (MOD08, MYD08), reflectancia (MOD09), índice de vegetación (MOD13), temperatura y emisividad de la superficie terrestres (MOD11), puntos de calor de incendios (MOD14).
- **Nivel 4:** Son obtenidos por la introducción de datos MODIS en modelos donde se estima variables geofísicas, creados a partir de datos nivel L2 y datos auxiliares. Entre ellos, se tiene el índice de área foliar/fracción de radiación activa fotosintética (MOD15), cobertura de suelo (MOD12) y producción primaria (MOD17).

III. VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1. Operacionalización de variables

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable dependiente	Dimensiones	Indicadores	Método
¿Cómo es la variación temporal del espesor óptico y la distribución del tamaño del aerosol atmosférico presente en la ciudad de Huancayo en el año 2016?	Analizar la variación temporal del espesor óptico y la distribución del tamaño del aerosol atmosférico presente en la ciudad de Huancayo en el año 2016.	La variación temporal del espesor óptico y la distribución del tamaño del aerosol atmosférico en la ciudad de Huancayo en el año 2016 es diaria, mensual y estacional debido a fuentes antropogénicas y a la quema de biomasa influenciada por las corrientes de viento.	VD: Espesor óptico del aerosol medido por AERONET	<ul style="list-style-type: none"> Variación del Espesor Óptico del aerosol Distribución de tamaños 	<ul style="list-style-type: none"> Variación diurna Variación mensual Variación estacional 	Estadística descriptiva
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable independiente	Dimensiones	Indicadores	Método
¿Existe correlación entre el espesor óptico del aerosol medido por el sensor MODIS y el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016?	Realizar el análisis de correlación entre el espesor óptico del aerosol medido por el sensor MODIS y el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016.	Existe correlación de los datos del espesor óptico del aerosol medido por el sensor MODIS y el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016.	VI: Espesor óptico del aerosol medido por MODIS	Correlación de los datos del Espesor óptico medido por MODIS y el fotómetro solar	<ul style="list-style-type: none"> Valor del coeficiente de correlación 	Regresión lineal

¿Cómo es la variación temporal del espesor óptico de los aerosoles medidos con el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016?	Analizar el comportamiento de la variación temporal del espesor óptico de los aerosoles medidos con el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016.	La variación temporal del espesor óptico de los aerosoles medidos con el sensor MODIS y el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016 variará de manera diaria, mensual y estacional.	VI: Espesor óptico del aerosol medido por MODIS	Variación temporal	<ul style="list-style-type: none"> • Variación diurna • Variación mensual • Variación estacional 	Análisis de Serie de tiempo
¿Cómo es la distribución del tamaño de los aerosoles atmosféricos medidos con el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016?	Analizar la distribución del tamaño de los aerosoles atmosféricos medidos con el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016.	La distribución del tamaño de los aerosoles atmosféricos medidos con el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016 se caracterizará en tamaño fino y grueso.	VI: Diámetro de partículas	Distribución de tamaños	Diámetro aerodinámico de las partículas	Análisis de Serie de tiempo

Fuente. Elaboración propia.

3.2. Hipótesis de la investigación

3.2.1. Hipótesis general

- La variación temporal del espesor óptico y la distribución del tamaño del aerosol atmosférico en la ciudad de Huancayo en el año 2016 es diaria, mensual y estacional debido a fuentes antropogénicas y a la quema de biomasa influenciada por las corrientes de viento.

3.2.2. Hipótesis específicas

- Existe correlación de los datos del espesor óptico del aerosol medido por el sensor MODIS y el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016.
- La variación temporal del espesor óptico de los aerosoles medidos con fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016 variará de manera diaria, mensual y estacional.
- La distribución del tamaño de los aerosoles atmosféricos medidos con el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo en el año 2016 se caracterizará en tamaño fino y grueso.

IV. METODOLOGÍA

4.1. Descripción de la metodología

4.1.1. Selección del área de estudio

El área a estudiar está ubicada en el Departamento de Junín abarcando parte de las provincias de Huancayo, Chupaca, Concepción y Jauja. Esta área se seleccionó teniendo en cuenta el análisis de correlación de los datos atmosféricos del sensor MODIS con los registros tomados por el fotómetro solar que pertenece a la Red AERONET. Por lo que, se ubicó las coordenadas del fotómetro solar (12.04020° Sur, 75.32090° Oeste) y se determinó su área de influencia (buffers) de 12.5 km del norte, sur, este y oeste de la ubicación del fotómetro solar, lo que indicaría que el área de estudio es una cuadrícula con un lado de 25 km (**Figura 6**).

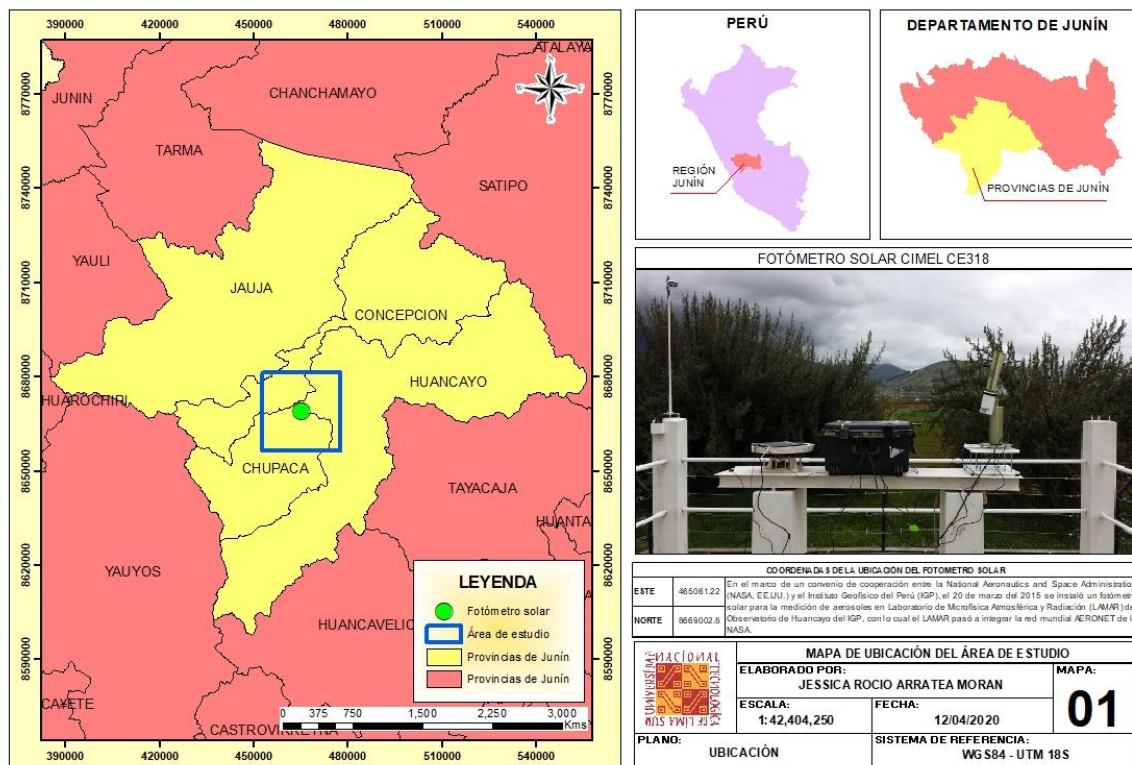


Figura 6. Mapa de ubicación del área de estudio. Elaboración propia.

Realización del análisis de correlación entre el espesor óptico del aerosol medido por el sensor MODIS y el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo para el año 2016.

Con respecto al objetivo específico 1, la validación de cualquier producto satelital implica la comparación con instrumentos en superficie calibrados (fotómetro CIMEL), cuyas mediciones se consideran la ‘verdad del suelo’. Las mediciones realizadas a nivel de la superficie y las registradas por satélite presentan diferencias como son: su resolución espacial y temporal, geometrías de medición, rango de validez y fiabilidad instrumental. Por lo que, la validación del espesor óptico de aerosoles obtenido por sensoramiento remoto satelital se realiza mediante una comparación con las mediciones tomadas por las estaciones de la red AERONET (fotómetro solar) la cual constituye una metodología de validación estándar para valores del espesor óptico que se obtienen con MODIS (como mencionó Ichoku *et al.*, 2002; Remer *et al.*, 2005) citado en Della, 2018).

4.1.2. Obtención de datos del sensor MODIS Aqua y Terra

Para este trabajo se utilizaron las mediciones del espesor óptico del aerosol obtenidas por el sensor MODIS (MYD08 para Satélite- Aqua y MOD08 para satélite- Terra) en el nivel 3 con cobertura global diario y resolución espacial de $1^\circ \times 1^\circ$, a una longitud de onda de 550 nm. Los datos se obtienen de la plataforma de MODIS (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) aplicación web trabajada por el DISCO GES para proporcionar un sencillo, intuitiva forma de ver, analizar y tener acceso a datos de teledetección de ciencias de la Tierra.

Para acceder a los datos utilizando la plataforma GIOVANNI es necesario delimitar el área ingresando las coordenadas del área de estudio. Por tal motivo, se identificó los puntos extremos de la cuadrícula de lado de 25 Km (área de estudio), asignando al vértice derecho superior como V-01 y al vértice izquierdo inferior como V-02 e identificando sus coordenadas geográficas (**Figura 7**).

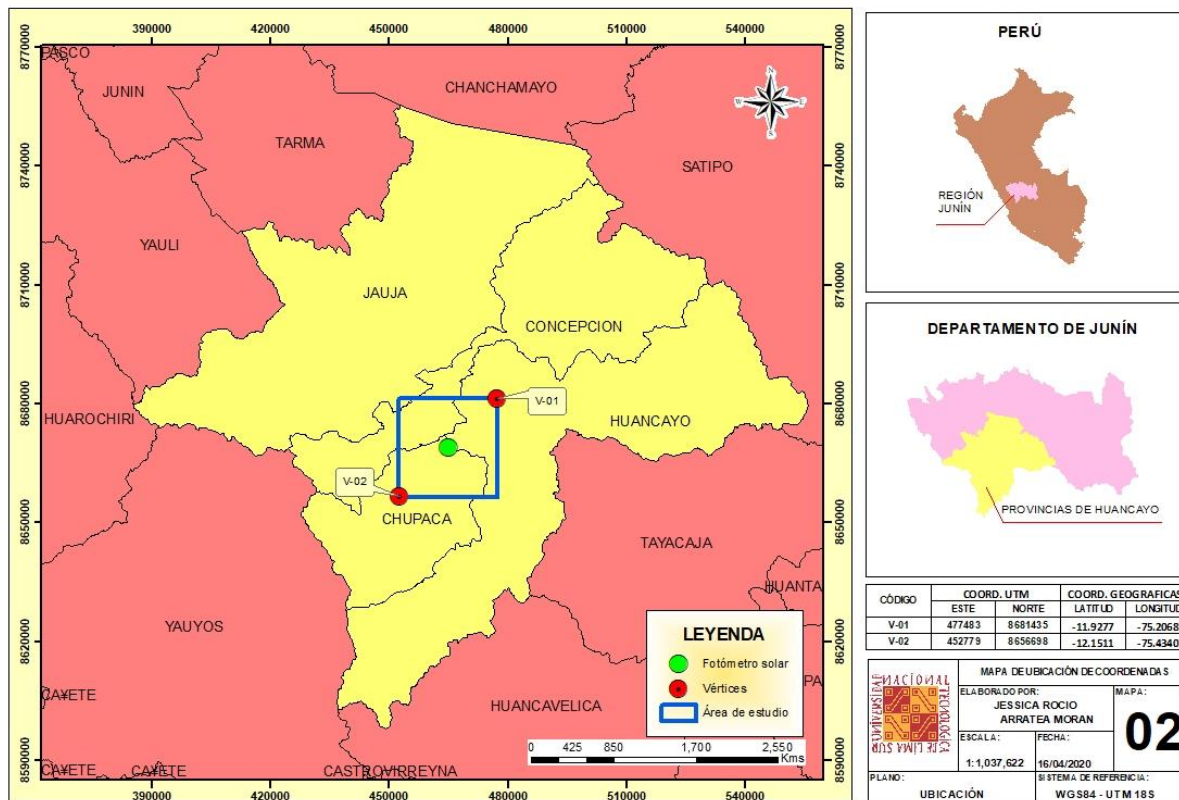


Figura 7. Mapa de ubicación de selección de cuadrícula espacial. Elaboración propia.

Entonces, las coordenadas identificadas serían (Tabla 4):

- Punto más a la latitud norte: -11.9277
- Punto más a la longitud este: -75.2068
- Punto más a la latitud sur: -12.1511
- Punto más a la longitud oeste: -75.434

Obteniendo las coordenadas geográficas de cada vértice:

Tabla 4

Coordenadas de los vértices de la cuadrícula de estudio

Vértices	Latitud	Longitud
V-01	-11.9277	-75.2068
V-02	-12.1511	-75.434

Fuente. Elaboración propia.

Una vez identificadas las coordenadas del área de estudio, obtendremos los datos del espesor óptico del aerosol realizando los siguientes pasos:

- Ingresar la cuenta y contraseña de la plataforma GIOVANNI <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- Nos dirigimos a “*Seleccionar parcela*”, sección “*Series de tiempo*” y seleccionamos la opción “*Serie de tiempo. promediada por área*”.
- Introducimos el rango de fechas en el formato Año, Mes, Día, (YY-MM-DD) para el año 2016 desde el 01 de enero al 31 de diciembre.
- Seleccionamos la región o ingresamos las coordenadas en formato Decimal Degrees, las cuales delimitarán en área de estudio (**Figura 8**). Las coordenadas se ingresarán en el siguiente orden: oeste, sur, este y norte (-180, -90, 180, 90): **-75.434, -12.1511, -75.2068, -11.9277**

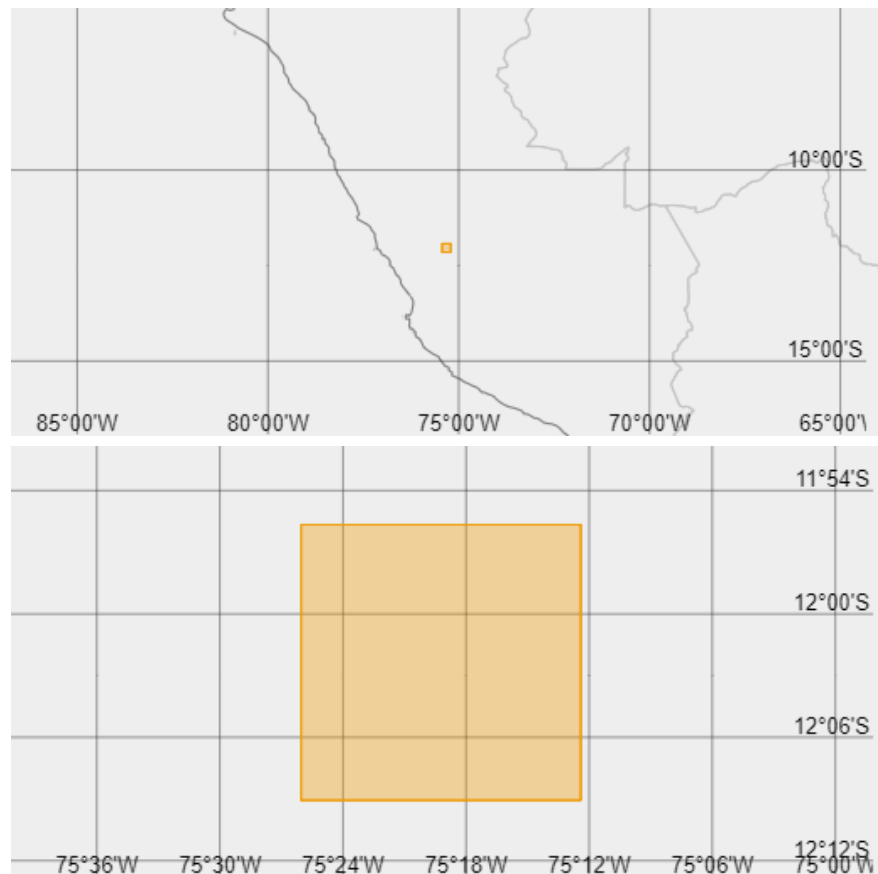


Figura 8. Cuadrícula espacial de 25 x 25 km. Recuperado de <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

- Luego, seleccionamos las variables correspondientes las cuales son:

Tabla 5

Variables para la obtención de datos del sensor MODIS

Observación:	<i>Observación</i>
Disciplina:	<i>Aerosoles</i>
Mediciones:	<i>Profundidad óptica del aerosol</i>
Plataforma/Instrumento:	<i>MODIS-Aqua o MODIS-Terra</i>
Resolución espacial	<i>1°</i>
Resolución Temporal:	<i>Diaria</i>
Longitud de onda	<i>550 nm</i>

Fuente. Elaboración propia.

- Luego, procedemos a seleccionar el producto ***Combined Dark Target and Deep Blue AOD at 0.55 micron for land and ocean: Mean (MYD08_D3 v6.1)***, seleccionamos los datos de la trama (***Plot Data***) y descargamos los datos en formato CSV.

Realizamos el procedimiento tanto para los datos de MODIS-Aqua como para MODIS-Terra.

4.1.3. Obtención de datos de la Red AERONET

Los datos fueron obtenidos de la interfaz de visualización de datos de la Red AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) que nos proporciona la profundidad óptica de aerosol espectral (AOD), productos de inversión y agua precipitable en diversos regímenes de aerosol (**Figura 9**). La información descargada es el espesor óptico de los aerosoles (AOD) con un nivel de calidad asegurada 2.0 y de versión 3 con la finalidad de reducir el error de los datos. Para la obtención de los datos del espesor óptico del aerosol realizamos los siguientes pasos:

- Seleccionamos una estación del Mapa de disponibilidad de datos de profundidad óptica del aerosol del nivel 2.0.

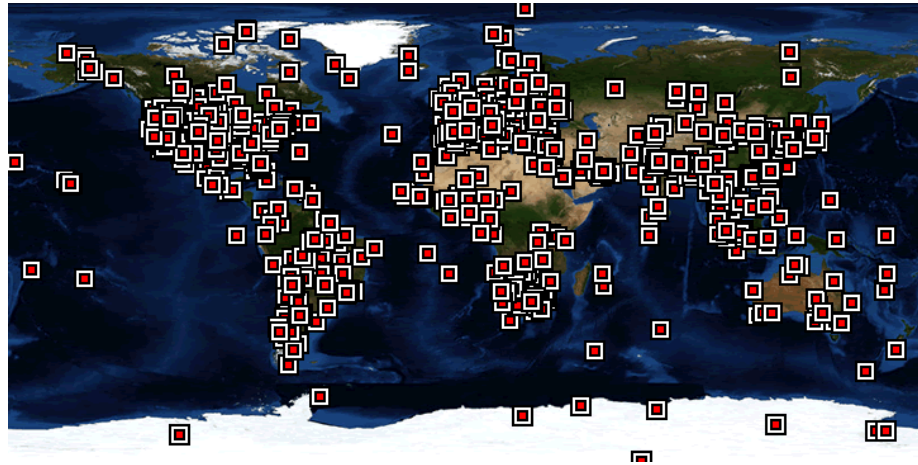


Figura 9. Estaciones de la Red AERONET a nivel mundial. Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA). Recuperado de la web de AERONET <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>

- Seleccionamos la estación [Huancayo-IGP](#) (12.040S, 75.321W).
- Nos dirigimos a “**Descargar AERONET**” y seleccionamos “más productos descargables de AERONET” en la herramienta de descarga.
- Introducimos la hora de inicio y finalización del periodo de descarga de datos desde el 01/01 hasta 31/12 del año 2016.
- Seleccionamos de **Direct Sun Products** los datos Aerosol Optical Depth (AOD) with Precipitable Water and Angstrom Parameter de level 2.0
- Escogemos el formato de datos “All Points” y descargamos.

4.1.4. Cálculo del espesor óptico del aerosol de AERONET a 550 nm

Para poder comparar los datos registrados por AERONET con la medición del sensor MODIS, los registros del fotómetro solar (Red AERONET) deben ser interpolados a una longitud de onda de 550 nm. Para ello se utilizará la técnica propuesta por (Prasad & Singh, 2007), que consiste en utilizar la media mensual del espesor óptico del aerosol (AOD) medido por AERONET a una longitud de onda de 500 nm y el exponente de angstrom (440-870 nm) con la finalidad de obtener el espesor óptico del

aerosol a una longitud de onda de 550 nm. Para ello, se utilizará la Ley de potencias basada en la siguiente ecuación:

$$AOD_{550\text{ nm}} = AOD_{500\text{ nm}} \left(\frac{550}{500}\right)^{-\alpha}$$

Donde α es el exponente de Angstrom (440–870 nm) obtenido de las mediciones de AERONET.

4.1.5. Validación de las medidas de los productos atmosféricos MODIS con los productos de CIMEL

La validación de las medidas de los datos atmosféricos de MODIS no es posible compararlos de manera directa con los productos de CIMEL debido a que los datos de MODIS representan un promedio espacial de un área, mientras que los datos del fotómetro solar CIMEL son medidos en un valor puntual. Además, es muy improbable que las condiciones de los datos tomados por MODIS y el fotómetro sean las mismas, debido a que sus ejes desde donde se realiza la observación son muy diferentes y la atmósfera se encuentra en constante movimiento. Del mismo modo, los tiempos de las mediciones de ambos instrumentos rara vez coinciden (Ichoku, y otros, 2002). Adicionalmente, las mediciones del espesor óptico de AERONET se definieron como el promedio las mediciones dentro de ± 60 min del tiempo de paso de MODIS (Bilal, E. Nichol, & Nazeer, 2016).

4.1.5.1. Correlación de datos MODIS / AERONET

Mientras que el fotómetro solar CIMEL mide la radiación solar a la altura del suelo o de superficie desde un punto exacto, el sensor MODIS orbita alrededor de la tierra midiendo la radiación solar reflejada en diferentes latitudes. Lo que indica, que el satélite no se encuentra situado de modo fijo si no que recoge radiaciones que son reflejadas y emitidas por la tierra en los distintos puntos de la órbita (Oraá, 2018). Por este motivo, para comparar los datos del espesor óptico del aerosol obtenido de AERONET y MODIS se debe aplicar un análisis de regresión lineal simple a la información, donde el parámetro r (coeficiente de correlación) va a permitir saber si los valores del eje de ordenadas (AOD de AERONET) con los valores del eje de abscisas (AOD de MODIS) se corresponden o están muy cerca. Si el coeficiente de correlación

tiene un valor cercano a 1 quiere decir que $x = y$, en cambio si el valor se aproxima a 0 no hay alguna relación entre ambos ejes (Oraá, 2018).

Se procesaron los datos con el software R, graficando la dispersión y regresión lineal de los datos.

4.1.5.2. Análisis e Interpretación de resultados

En este paso, se procede a realizar el proceso respectivo para su análisis, para que posteriormente se emita las conclusiones respectivas.

Análisis del comportamiento de la variación temporal del espesor óptico de los aerosoles medidos con el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo para el año 2016.

Para alcanzar el segundo objetivo específico de la presente tesis se explica a continuación:

4.1.6. Estadísticas descriptivas

Para este estudio, se utilizó el espesor óptico de AERONET a una longitud de onda de 550 nm que fueron procesados con el software R agrupándolos de manera diaria, mensual y estacional mediante series de tiempo.

4.1.7. Análisis e Interpretación de resultados

En esta parte se describió los aspectos abordados a lo largo de la investigación realizada, los resultados obtenidos y su análisis del comportamiento del espesor óptico son explicados en la conclusión de la investigación.

Análisis de la variación de la distribución del tamaño de los aerosoles atmosféricos medidos con el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo para el año 2016.

Con el propósito de alcanzar el tercer objetivo, se explica a continuación:

4.1.8. Obtención de datos del diámetro de partículas

Los datos fueron obtenidos de la interfaz de visualización de datos de la Red AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) junto con la descarga de los datos del espesor óptico del aerosol atmosférico que son obtenidos a partir de la inversión de los valores medios mensuales de la profundidad óptica de los aerosoles distribuidos en 22 discretos tamaños de inversión los cuales serán procesados con el software R.

Adicionalmente, el parámetro de Ångström que guarda inversamente relación con el tamaño de las partículas de aerosol. Por lo tanto, el parámetro de Ångström nos va a permitir evaluar del tamaño de las partículas de aerosol. Este parámetro también es obtenido junto con la descarga de los datos del espesor óptico y por conveniencia se utilizará los datos a una longitud de 440 a 870 nm.

4.1.9. Estadísticas descriptivas

Para representar gráficamente la cantidad de partículas por volumen de aire los datos fueron distribuidos a escala logarítmica en el eje x para una mejor visualización de las modas (modo fino y modo grueso) mientras que el eje de ordenadas es representado por la cantidad de partículas.

Adicionalmente, para el estudio del coeficiente de angstrom (440-870 nm) se agrupo las medias diarias del AOD y el parámetro de angstrom representándolos en el eje x y eje y respectivamente. Finalmente, se identificó los tipos de aerosoles.

4.1.10. Análisis e Interpretación de resultados

Aplicada la metodología correspondiente se realizó el análisis de los resultados, por cuanto la información obtenida es indicada en las conclusiones de la investigación.

4.2. Implementación de la investigación

4.2.1. Pruebas realizadas

Los datos extraídos de las plataformas MODIS y AERONET fueron limpiados retirando los valores negativos y cero de las mediciones. Para que posteriormente se realicen las siguientes pruebas:

Tabla 6

Pruebas realizadas a los datos procedentes de AERONET

Pruebas	Descripción
Medias diarias	Promedio de los datos horarios
Medias mensuales	Promedio de las medias diarias
Medias estacionales	Promedio de las medias diarias de los meses que agrupan los meses de cada estación

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

La población abarca el total de las mediciones del espesor óptico del aerosol tomadas por el fotómetro solar ubicado en la ciudad de Huancayo.

4.3.2. Muestra

La muestra fue no probabilística debido a que los elementos elegidos no dependen de la probabilidad, sino de las características de la investigación. Es decir, que la muestra fue elegida por conveniencia debido a que se contaba con la mayor cantidad de datos en el año 2016. La muestra del espesor óptico del aerosol comprende desde el 01 de enero hasta el 31 diciembre del año 2016.

4.4. Técnicas de recolección y datos

Los datos fueron extraídos de la plataforma GIOVANNI (espesor óptico del aerosol de MODIS-Aqua y MODIS-Terra) y la plataforma de la Red AERONET (espesor óptico del aerosol del fotómetro solar CIMEL).

Tabla 7

Fuentes de recolección de datos

Instrumentos	Periodo de tiempo	Producto	Banda espectral
MODIS	Diario	Level 3	550 nm
AERONET	10 minutos	Level 2.0	500 nm

Fuente: Elaboración propia.

4.5. Instrumentos de recolección de datos

4.5.1. Validez

Los datos del sensor MODIS como los de la Red de AERONET pasan por una validación antes de ser descargados. Para el caso de los datos MODIS el proceso de validación por la NASA pasa por las siguientes fases:

- **Fase 1:** La confiabilidad del producto se estima usando medidas independientes que se obtienen de un pequeño número de sitios y periodos de tiempo.
- **Fase 2:** La confiabilidad se realiza con base en un amplio grupo de sitios y fechas; además, de tener muchos datos de campo.
- **Fase 3:** La confiabilidad se obtiene por medio de medidas independientes que se realizan de manera sistemática y estadísticamente robusta que representa las condiciones.

Mientras que para los datos de la Red AERONET por la NASA pasan por dos fases llegando a una calidad asegurada 2.0.

Adicionalmente, se realizó una correlación del espesor óptico del aerosol de ambos instrumentos con la finalidad de estimar el grado de correlación.

Tabla 8

Análisis de la estimación de los datos de AOD registrados por el sensor MODIS frente a los de AERONET

Variable	Validación	Procesamiento
Espesor óptico de los aerosoles	Los datos obtenidos de la plataforma digital de MODIS (registrados por el sensor a bordo de los satélites Aqua y Terra) fueron validados con los datos obtenidos a nivel de superficie disponibles en la plataforma digital de AERONET (registrados por el fotómetro solar del Observatorio de Huancayo).	Se realizó la correlación de los datos medidos satelitalmente, por Aqua y Terra, con los datos medidos en superficie, por AERONET, para su validación. Ambos a una longitud de onda de 550 nm,

Fuente: Elaboración propia.

4.5.2. Confiabilidad

La información utilizada fue recuperada con la mayor precisión en nuestro análisis.

Tabla 9

Características de los datos

Instrumentos	Producto	Calidad
AERONET	Level 2.0	Calidad asegurada (sin nubosidad y con una calibración del aparato después de un periodo de mediciones en la estación).

Fuente: Elaboración propia.

4.6. Resultados

4.6.1. Realización del análisis de correlación entre el espesor óptico del aerosol medido por el sensor MODIS y el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo para el año 2016.

Los resultados del objetivo específico 1 se presenta a continuación:

4.6.1.1. Correlación de MODIS-Aqua vs AERONET

El τ_a MODIS (Tabla 10) fue emparejado con el valor correspondiente de τ_a AERONET (Tabla 11) y procesado estadísticamente dentro de una ventana de espacio-tiempo óptima desde la cual se ha producido un diagrama de dispersión de τ_a MODIS-AQUA vs. τ_a AERONET.

Tabla 10

Información de los datos procedentes del satélite AQUA

Satélite	Sensor	Días analizados	Cantidad de datos
AQUA	MODIS	46	82

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11

Información de los datos procedentes de la Red AERONET

Estación	Instrumento	Días analizados
Observatorio de Huancayo	Fotómetro solar	46

Fuente: Elaboración propia.

La figura 10, nos indica los valores de regresión del AOD entre MODIS-AQUA y AERONET a 550 nm para el periodo de enero a diciembre del año 2016. La relación de correlación r es de 0.44, lo que sugiere que los productos provenientes del sensor MODIS a bordo del satélite AQUA presentan una correlación positiva regular con las mediciones de AERONET.

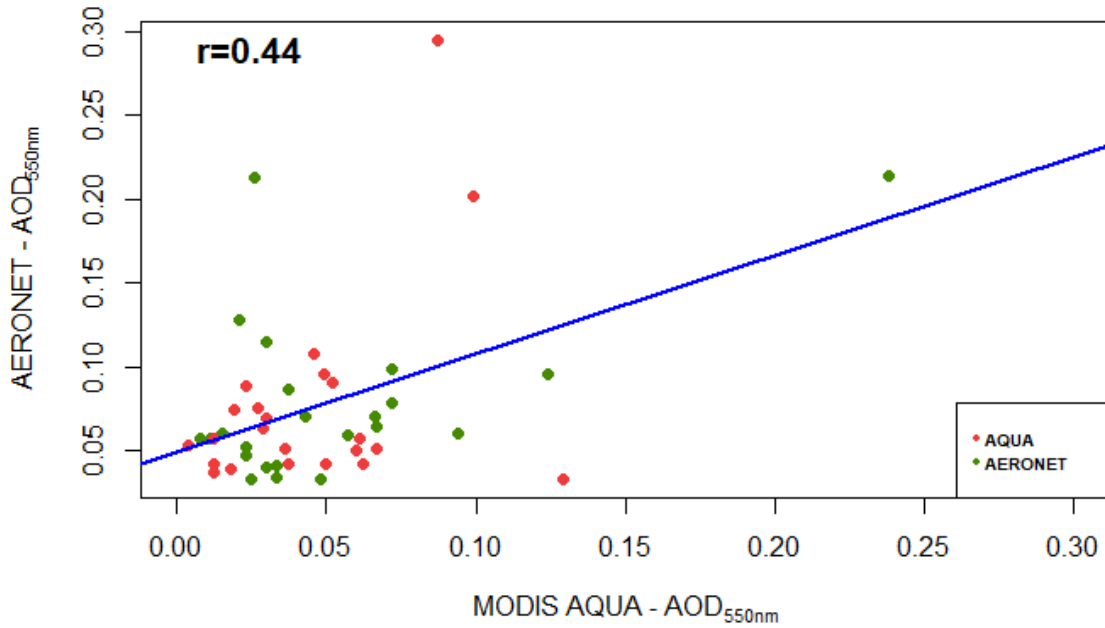


Figura 10. Correlación del espesor óptico del aerosol procedentes del satélite AQUA frente a AERONET.

En la figura 11, se muestra que el satélite AQUA no mide correctamente la profundidad óptica del aerosol, pero el orden de magnitud es parecido a la medición real realizada por el equipo CIMEL perteneciente a la Red AERONET.

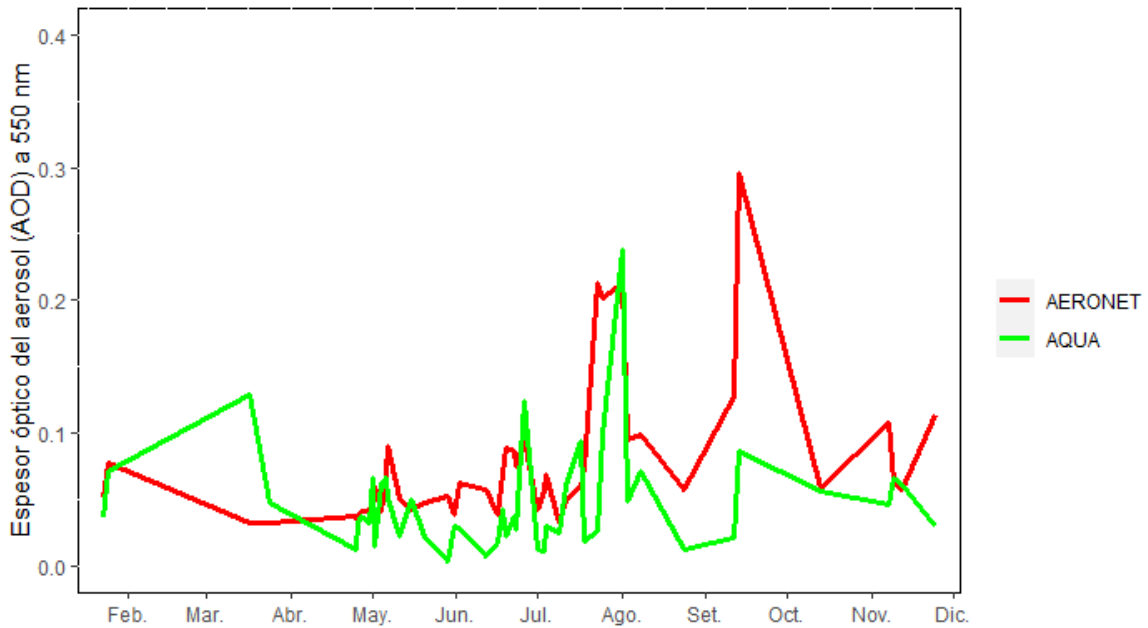


Figura 11. Variabilidad anual del espesor óptico del aerosol del satélite AQUA y AERONET.

4.6.1.2. Correlación de MODIS-Terra vs AERONET

El τ_{MODIS} (Tabla 12) ha sido emparejado con el valor correspondiente de τ_{AERONET} y procesado estadísticamente dentro de una ventana de espacio-tiempo óptima desde la cual se ha producido un diagrama de dispersión de τ_{MODIS} vs. τ_{AERONET} (Tabla 13).

Tabla 12

Información de los datos procedentes del satélite AQUA

Satélite	Sensor	Días analizados	Cantidad de datos
TERRA	MODIS	26	117

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13

Información de los datos procedentes de la Red AERONET

Estación	Instrumento	Días analizados
Observatorio de Huancayo	Fotómetro solar	26

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente imagen (**Figura 12**), nos muestra los resultados de regresión entre el AOD para MODIS-TERRA y AERONET a 550 nm para el periodo de enero a diciembre del año 2016. La relación de correlación r es de 0.62, lo que sugiere que los productos procedentes del sensor MODIS a bordo del satélite Terra presentan una correlación positiva con las mediciones de AERONET.

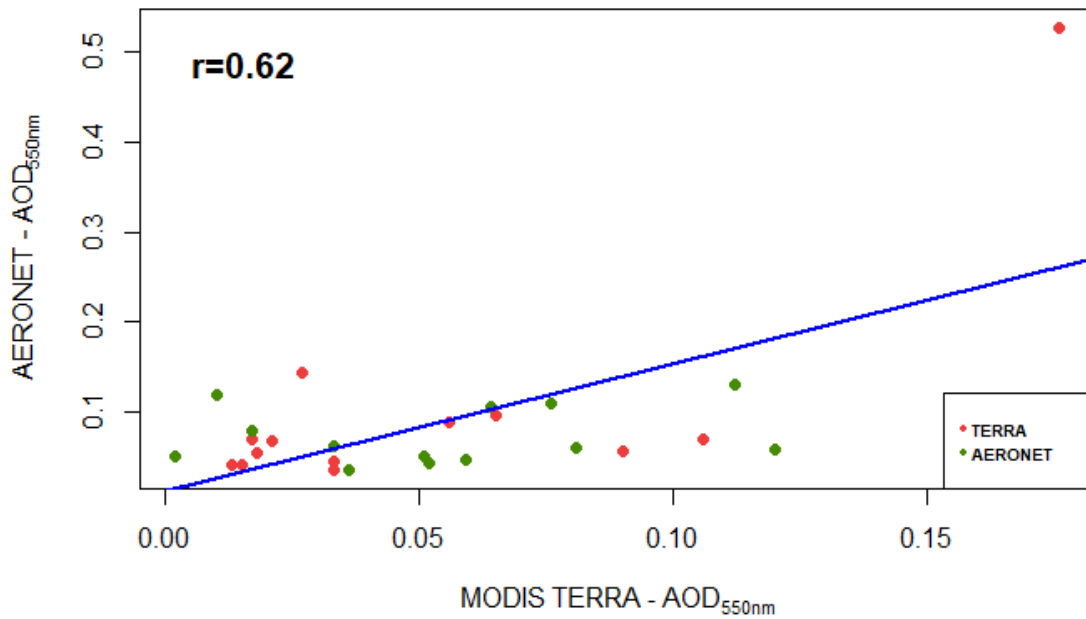


Figura 12. Medias diarias del espesor óptico del aerosol procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

La Figura 13, nos muestra que los datos del espesor óptico del sensor MODIS a bordo del satélite TERRA muestran similitud en la variación mensual durante el periodo de estudio a los valores reales medidos por el equipo CIMEL; sin embargo, el satélite no ha reproducido el valor máximo de AERONET ($\tau_a = 0.5266$) durante el mes de septiembre.

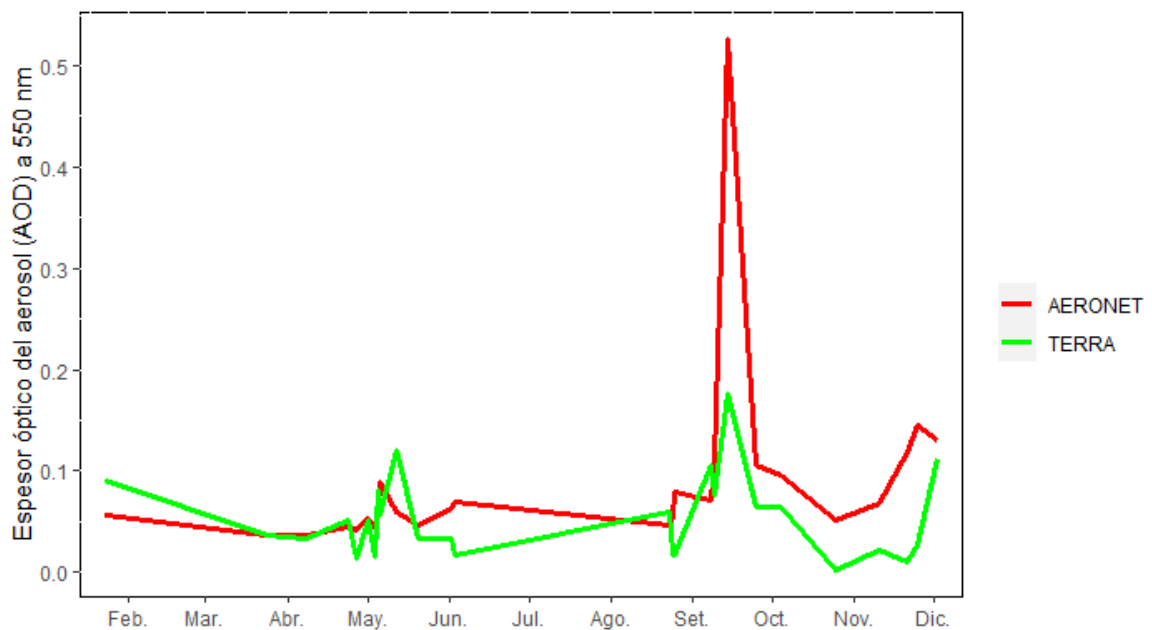


Figura 13. Variabilidad anual del espesor óptico del aerosol del satélite AQUA y AERONET.

Tabla 14

Variables estadísticas del análisis de correlación

AOD	r	RMSE	BIAS
AQUA-AERONET	0.44	0.06	-0.03
TERRA-AERONET	0.62	0.08	-0.04

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se obtuvo la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para AQUA y TERRA obteniendo 0.06 y 0.08 respectivamente dando a entender que las mediciones del satélite tienen errores.

4.6.2. Análisis del comportamiento de la variación temporal del espesor óptico de los aerosoles medidos con el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo para el año 2016.

Los resultados del segundo objetivo específico se muestran a continuación:

El espesor óptico de aerosol (τ_a) guarda relación con la cantidad de materia ópticamente activa en la columna atmosférica. En la siguiente figura (**Figura 14**) se muestra los valores medios diarios del espesor óptico del aerosol (τ_a) y como se aprecia los valores presentan un aumento desde el mes agosto hasta el mes de septiembre. Además, se aprecia claramente que el valor más alto de AOD se registra en el mes de septiembre, mes en el que se reportan gran cantidad de número de incendios forestales y como resultado se produce un incremento de los valores medios diarios del espesor óptico del aerosol.

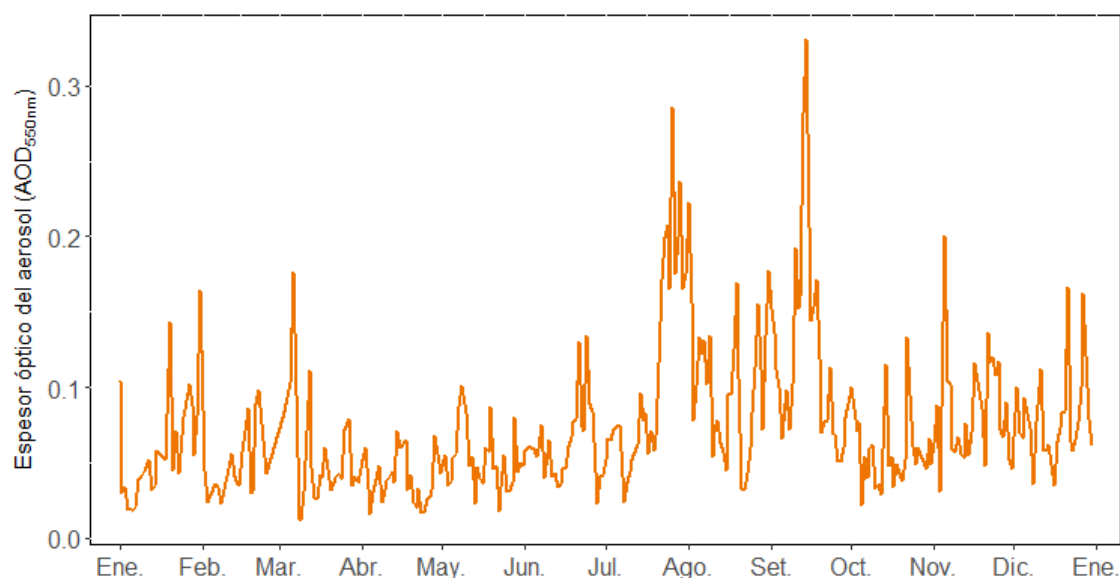


Figura 14. Variabilidad diaria del espesor óptico del aerosol procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Tabla 15

Resumen de variables estadísticas de las medias diarias del espesor óptico del aerosol

VARIABLES	AOD_{550nm}
Promedio	0.0734
Desviación estándar	0.0471
Mínimo	0.0117
Máximo	0.3309
Mediana	0.0601
1er Q	0.0422
3er Q	0.0888

Fuente: Elaboración propia.

El valor promedio del AOD es **0.0734**, con una desviación estándar de ± 0.0471 . Además, en la tabla podemos encontrar los valores máximos y mínimos para toda la serie de datos. La mediana nos da a entender de que el 50% de las observaciones están por debajo de **0.0601** (Tabla 15).

Si desagregamos los datos de todo el periodo de estudio se tiene que para el mes de enero (**Figura 15**) la variabilidad de los valores del espesor óptico se mantiene casi constante; excepto, para el 20, 27 y 31 los valores del AOD son **0.1432**, **0.1025** y **0.1642** respectivamente.

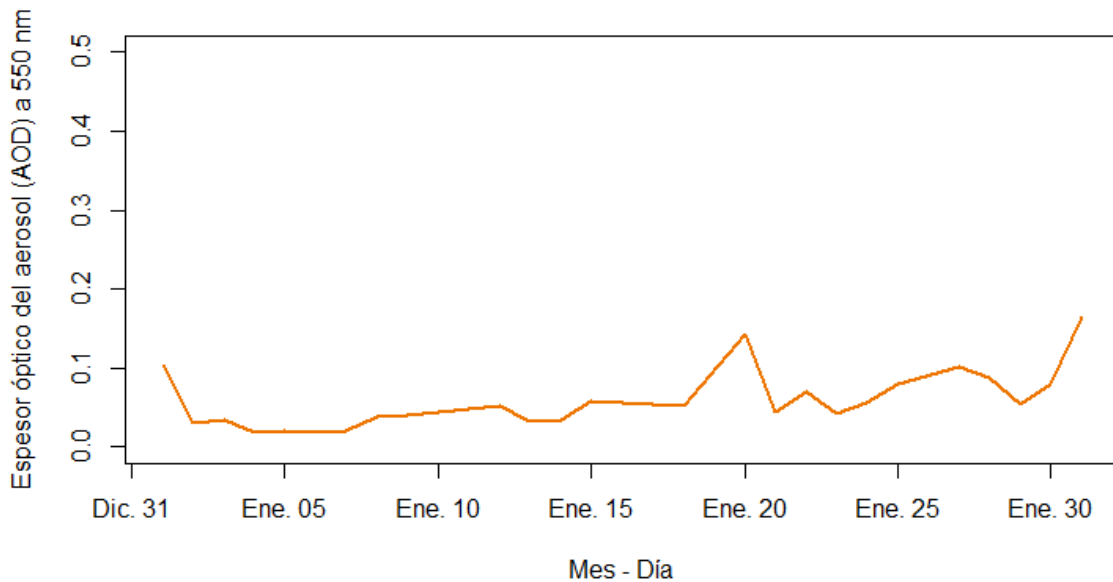


Figura 15. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de enero procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Para el mes de febrero (**Figura 16**), los valores del espesor óptico no sobrepasan el 0.1 registrándose como valor máximo **0.0984** para el 22 de febrero.

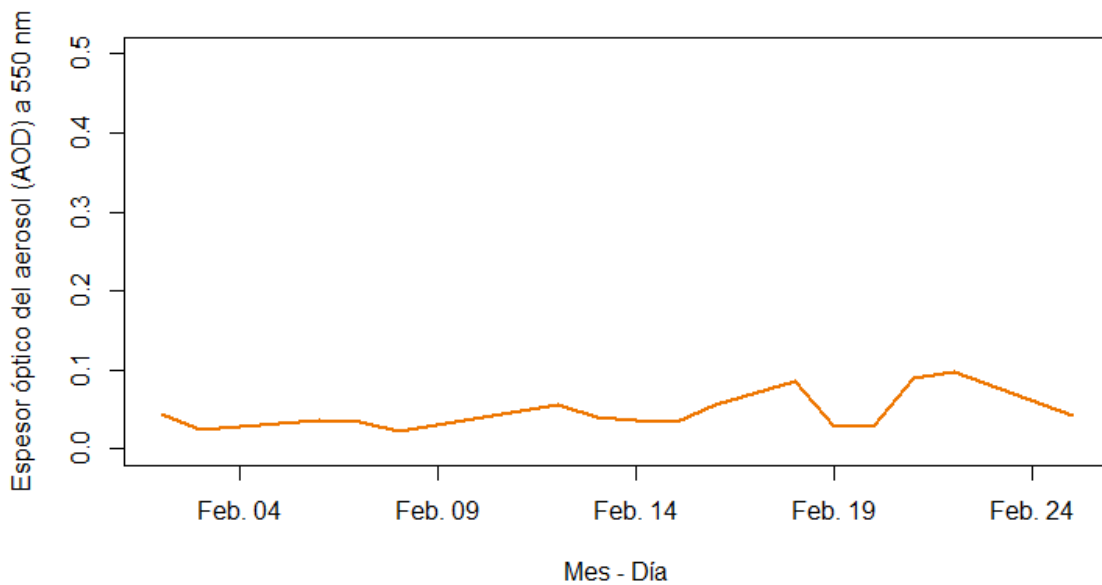


Figura 16. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de febrero procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Para el caso del mes de marzo (**Figura 17**), vemos que para inicios del mes se registran valores que oscilan entre 0.1 y 0.2, tal es el caso para el 5, 6 y 12 de marzo con **0.1032**, **0.1759** y **0.1109**. Con respecto a los demás días los valores se mantienen por debajo de 0.1.

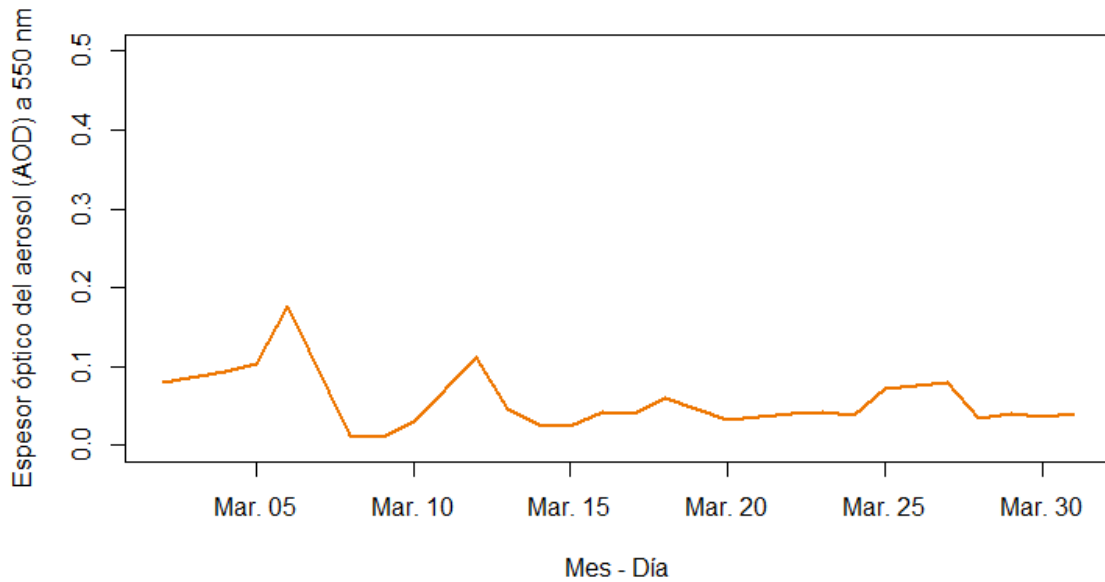


Figura 17. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de marzo procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

En el mes de abril (**Figura 18**), los valores registrados oscilan entre 0 y 0.1 obteniéndose un máximo para el día 14 con **0.0712**.

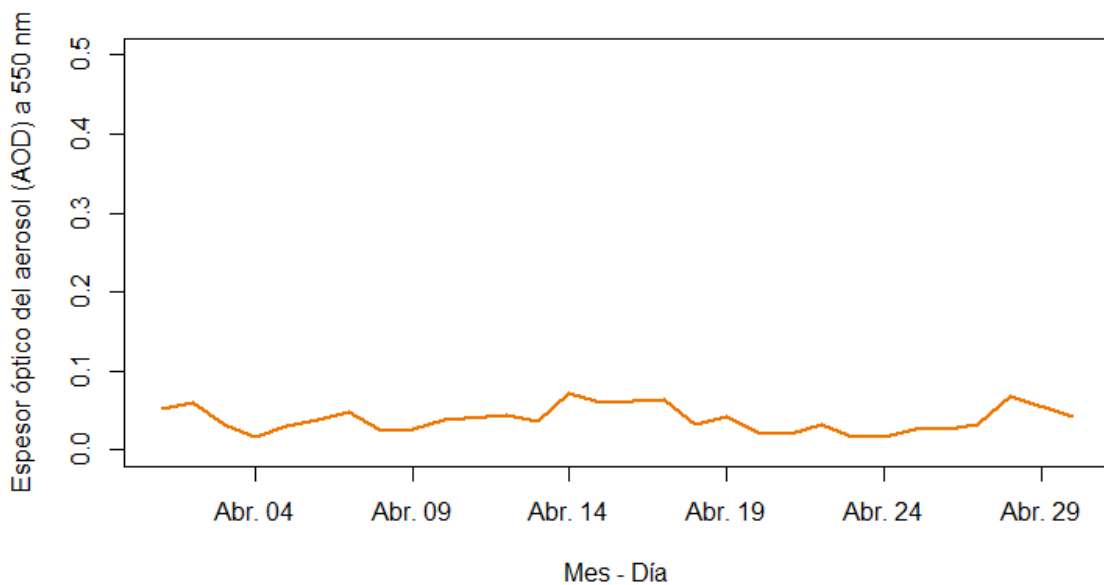


Figura 18. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de abril procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Para el mes de mayo (**Figura 19**), los valores se mantienen constantes a los meses anteriores excepto el día 8 que el valor del espesor óptico es **0.1016**.

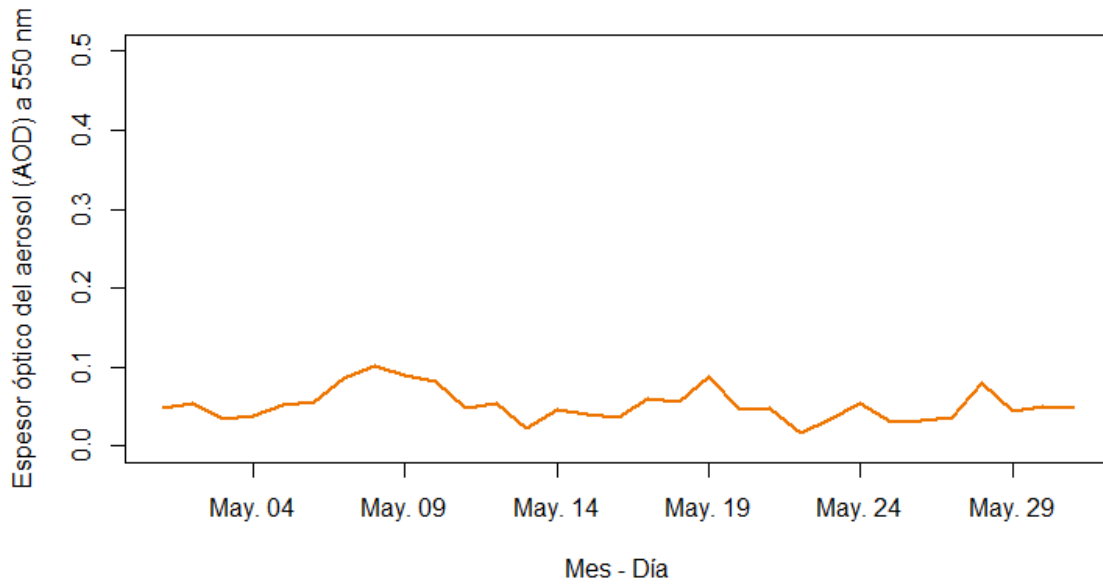


Figura 19. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de mayo procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Para el mes de junio (**Figura 20**), observamos que se presentan dos eventos a finales del mes donde se registran **0.1299** y **0.1339** para los días 21 y 24 respectivamente. Para los demás días, el valor del espesor óptico se mantiene constante a los meses anteriores.

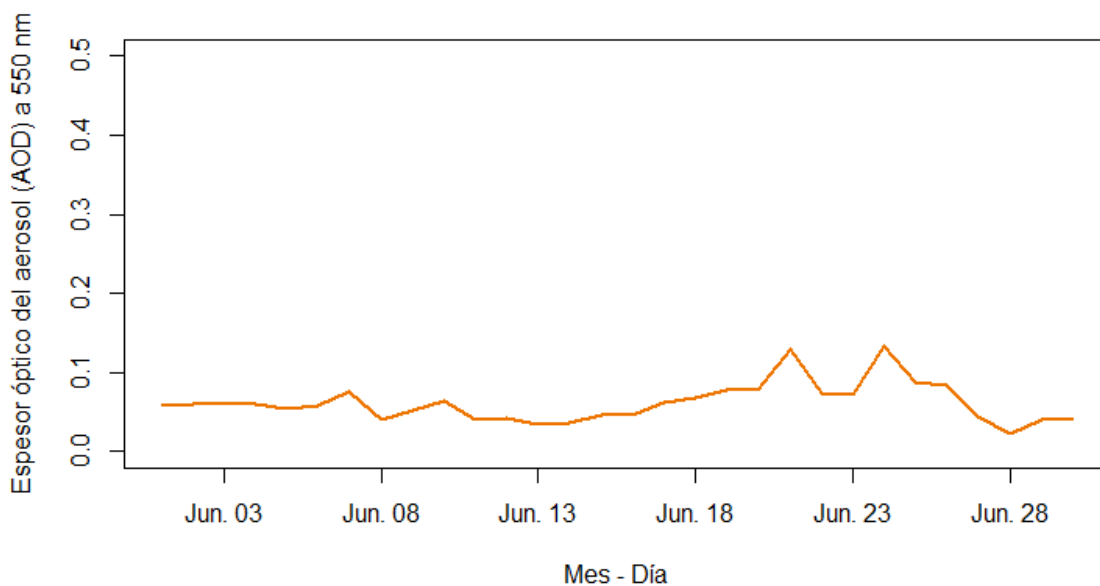


Figura 20. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de junio procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Para julio (**Figura 21**), observamos que a partir del 20 de julio los valores del espesor óptico aumentan progresivamente alcanzando un valor máximo el 26 de julio con **0.2855**, para el caso de los días hacia adelante los valores se mantienen entre 0.1 y 0.2.

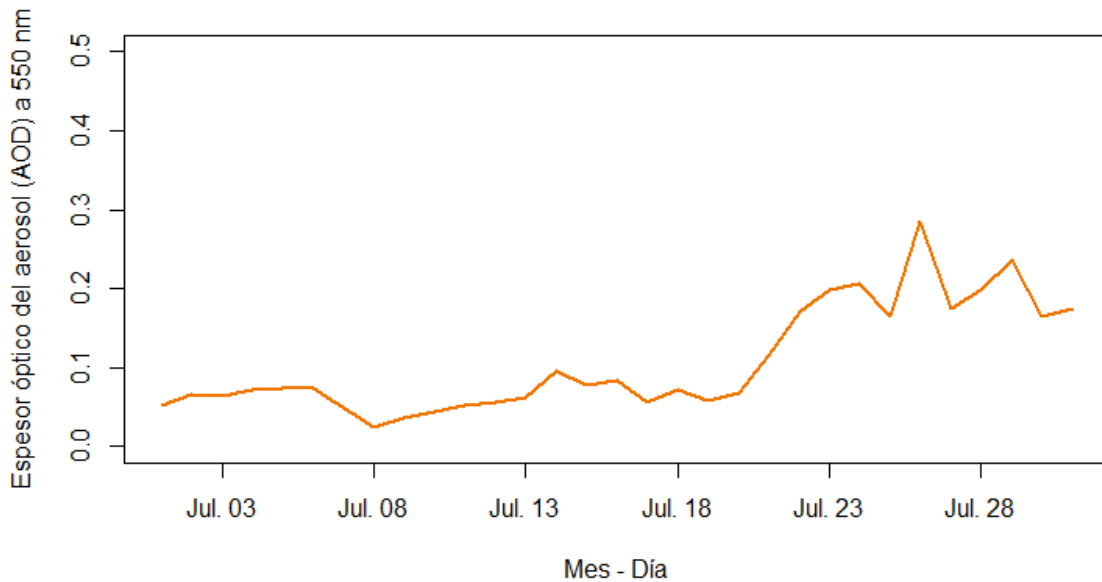


Figura 21. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de julio procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Para el mes de agosto (**Figura 22**), empezamos el mes con **0.2224** para el día 1, para el día 19 se registra **0.1697** y finalizamos el mes con **0.1777**. Para el caso de los demás días los valores del espesor óptico han aumentado con respecto a los meses anteriores.

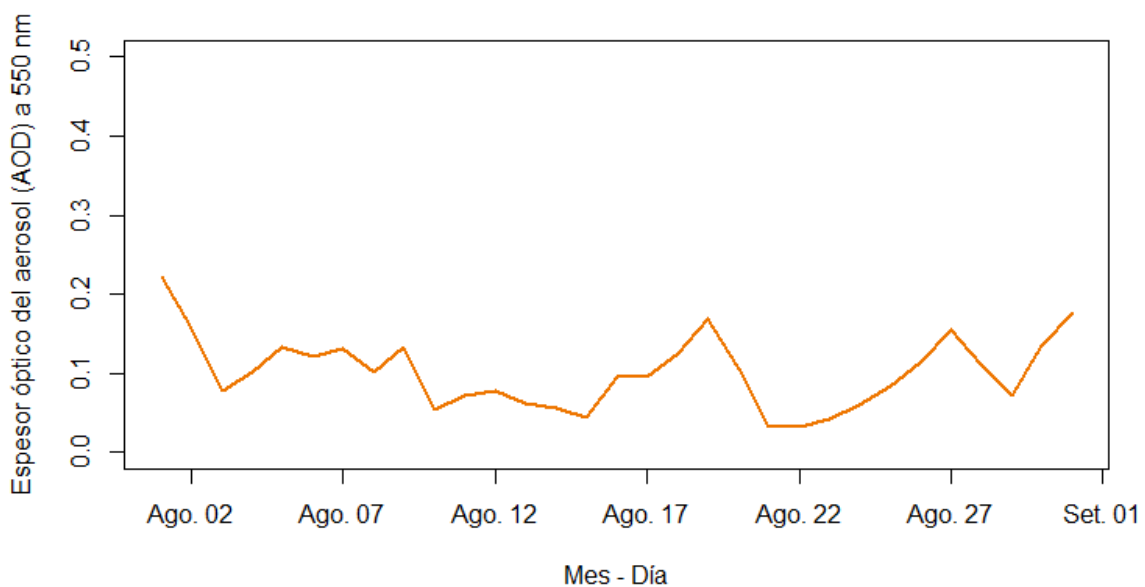


Figura 22. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de agosto procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Para septiembre (**Figura 23**), se presenta el máximo valor para todo el periodo de estudio registrándose el 14 de septiembre **0.3309** mientras que para los demás días los valores decrecen consecutivamente.

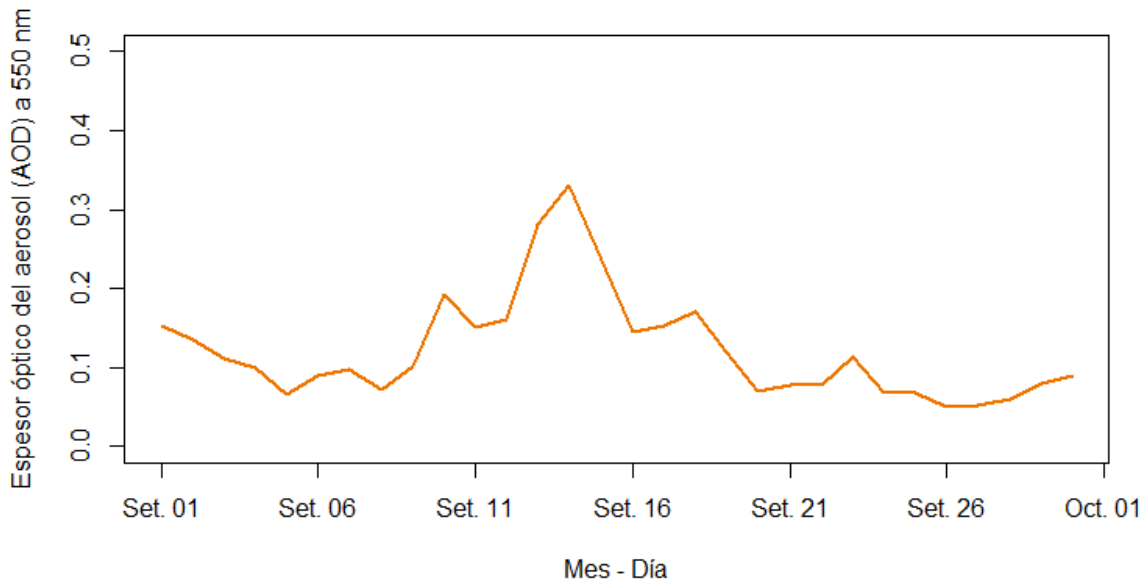


Figura 23. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de septiembre procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Para octubre (**Figura 24**), los valores del espesor óptico disminuyen y se mantienen constantes; excepto para el día 22 del mes en estudio que se registra un valor de espesor óptico de **0.1391**.

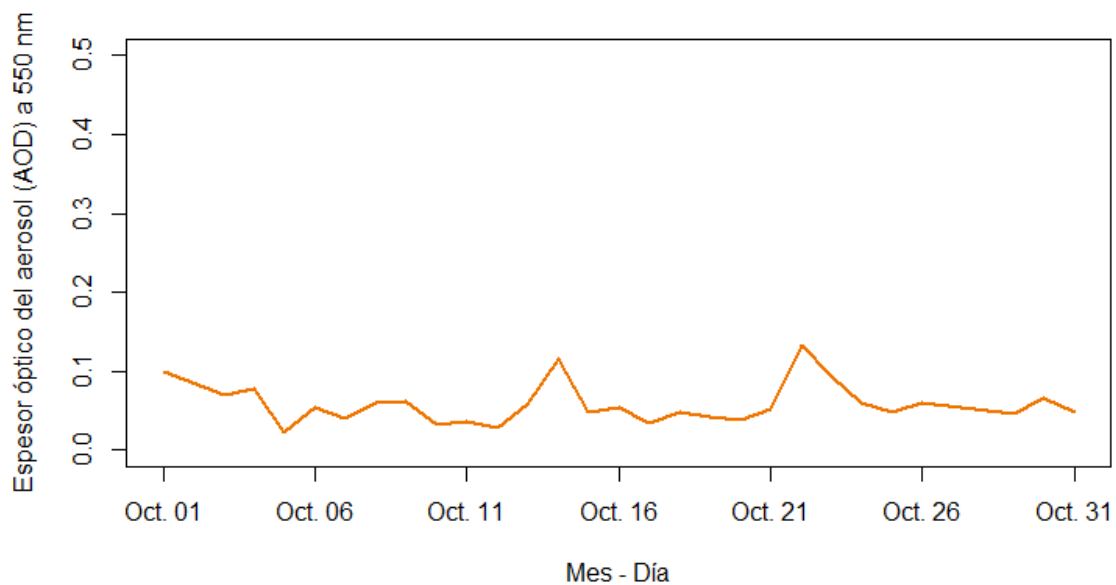


Figura 24. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de octubre procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Para el penúltimo mes del periodo de estudio (**Figura 25**), el máximo valor se presenta el 5 de noviembre con un valor de 0.2. Para los demás días los valores se mantienen entre 0 y 0.15.

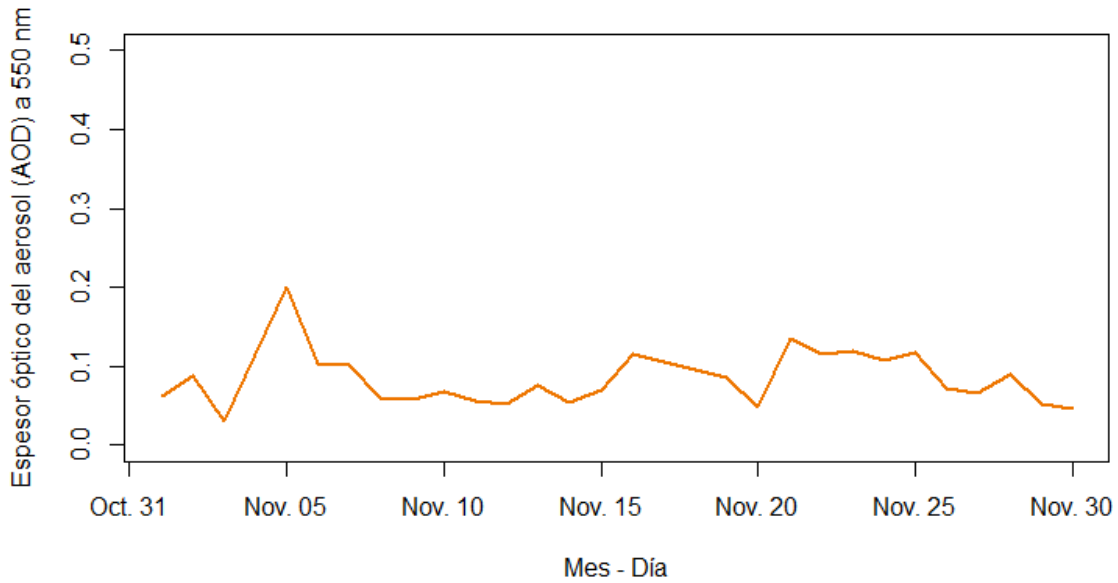


Figura 25. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de noviembre procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Finalmente, para el mes de diciembre (**Figura 26**), los valores oscilan entre 0 y 0.13, y se registra como valor máximo el 27 de diciembre con **0.1628**.

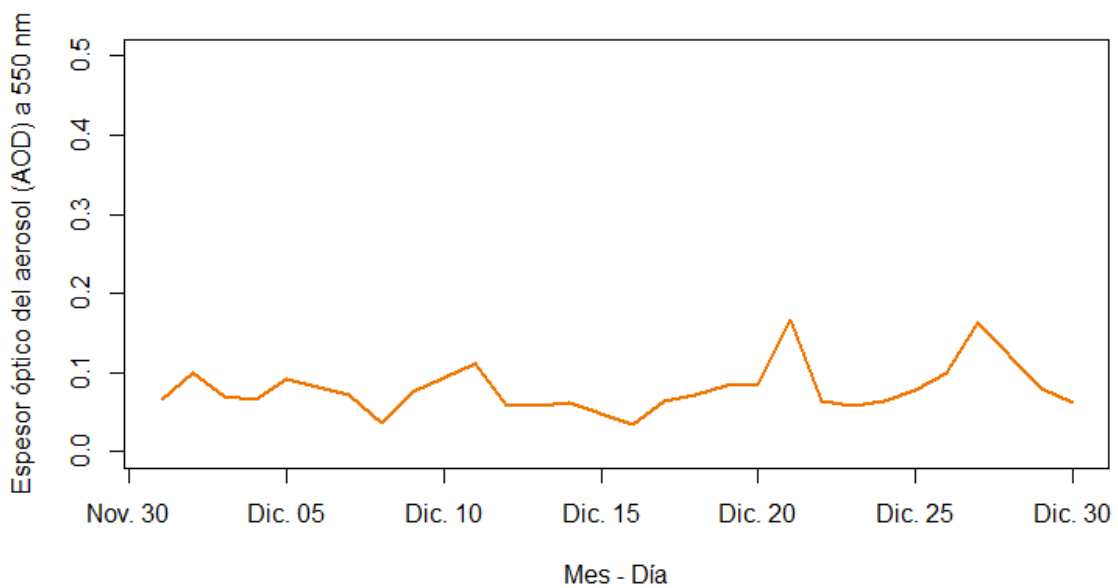


Figura 26. Medias diarias del espesor óptico del aerosol para el mes de diciembre procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Con mayor precisión podemos observar el calendario que expresa el grado de la concentración de los aerosoles para cada día del periodo de estudio, obteniendo que para los meses de julio, agosto y septiembre se tiene una mayor concentración del espesor óptico del aerosol. De este modo, observamos que el mayor valor registrado a una longitud de onda de 550 nm es 0.3309 ± 0.1205 que tuvo lugar el 14 de setiembre (Figura 27) y el menor valor registrado se dio el 9 de marzo con un valor de 0.0117 ± 0.0090 .

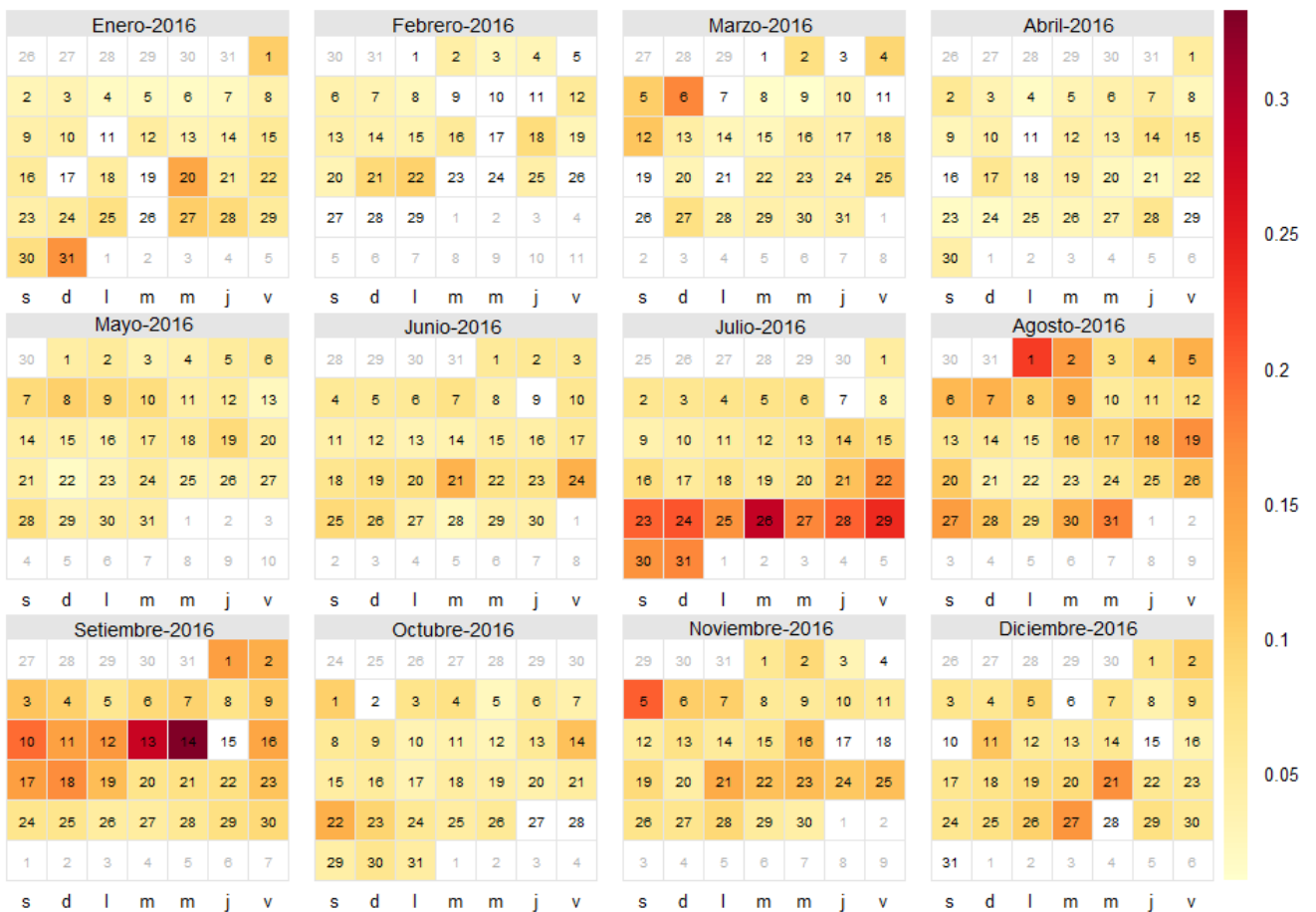


Figura 27. Calendario del espesor óptico del aerosol procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Caracterización de la variación mensual

Se puede apreciar que el comportamiento de las medias mensuales del espesor óptico del aerosol (τ_a) va en aumento desde el mes de julio hasta septiembre (**Figura 28**), y es en este último mes donde se registra el mayor valor del espesor óptico del aerosol con 0.1186 ± 0.0651 y el valor mínimo en el mes de abril con 0.0379 ± 0.0160 . Seguidamente, entre los meses con mayor espesor óptico tenemos los meses de julio, agosto, y noviembre los cuales presentan un valor de 0.1094 ± 0.0691 , 0.1017 ± 0.0459 , 0.0835 ± 0.0362 respectivamente. (Tabla 16).

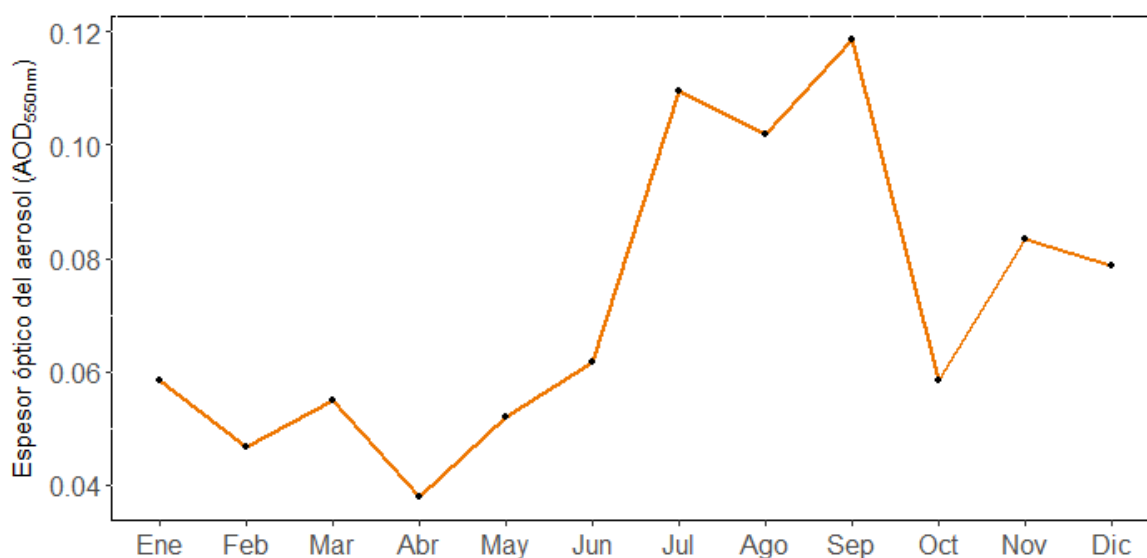


Figura 28. Variabilidad mensual del espesor óptico del aerosol procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Tabla 16

Resumen de las variables estadísticas de las medias mensuales del espesor óptico del aerosol.

Mes	N° de días	AOD-prom _{550nm}	Desviación estándar
Enero	27	0.0585	± 0.0365
Febrero	17	0.0466	± 0.0233
Marzo	24	0.0550	± 0.0371
Abril	27	0.0379	± 0.0160
Mayo	31	0.0521	± 0.0206
Junio	29	0.0617	± 0.0254
Julio	30	0.1094	± 0.0691

Agosto	31	0.1017	± 0.0459
Setiembre	29	0.1186	± 0.0651
Octubre	28	0.0583	± 0.0258
Noviembre	27	0.0835	± 0.0362
Diciembre	26	0.0786	± 0.0307

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, si observamos la distribución de los datos en una gráfica de caja se visualiza claramente que los meses en los que se presenta menor nivel de espesor óptico son abril, febrero y marzo presentando una asimetría positiva para esos meses (**Figura 29**). Mientras que los meses de abril y febrero se presenta una mayor concentración de datos en valores menores a **0.0327** y **0.0363** respectivamente; para el caso, del mes de mayo se presenta una asimetría negativa con una mayor concentración en la parte superior de la distribución con valores superiores a **0.0479** además de presentar valores atípicos. Del mismo modo, los meses con mayor valor de espesor óptico del aerosol como son julio, agosto y septiembre. Se describe que para el mes de julio, los valores del espesor óptico se concentran en la parte inferior de la distribución mientras que la parte superior indica que los valores están más dispersos alcanzando el mayor rango durante todo el periodo de estudio. Mientras, que para el caso del mes de agosto observamos una distribución simétrica de los datos y finalmente para el mes de septiembre se presenta una asimetría positiva con valores concentrados en la parte inferior de la distribución y con incidencia de valores atípicos superiores a 0.2.

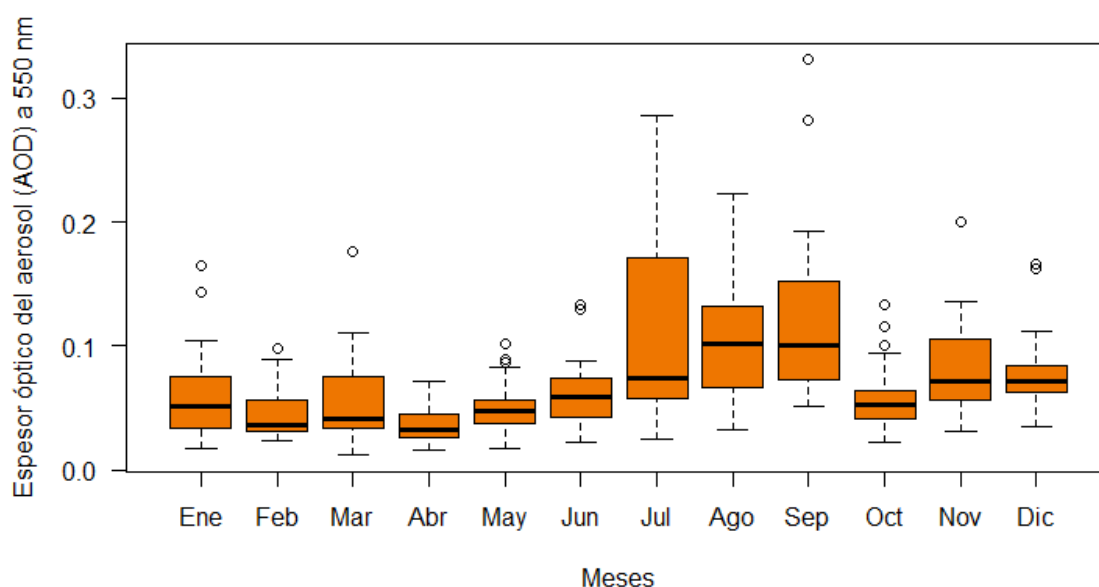


Figura 29. Gráfica de caja del espesor óptico del aerosol procedente de la estación del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Caracterización estacional

En la siguiente imagen (**Figura 30**), se muestra la variabilidad estacional del espesor óptico del aerosol calculada a partir de las medias diarias para cada estación considerándose verano (enero y febrero), otoño (marzo, abril y mayo), invierno (junio, julio y agosto), primavera (septiembre, octubre y noviembre) y verano (diciembre).

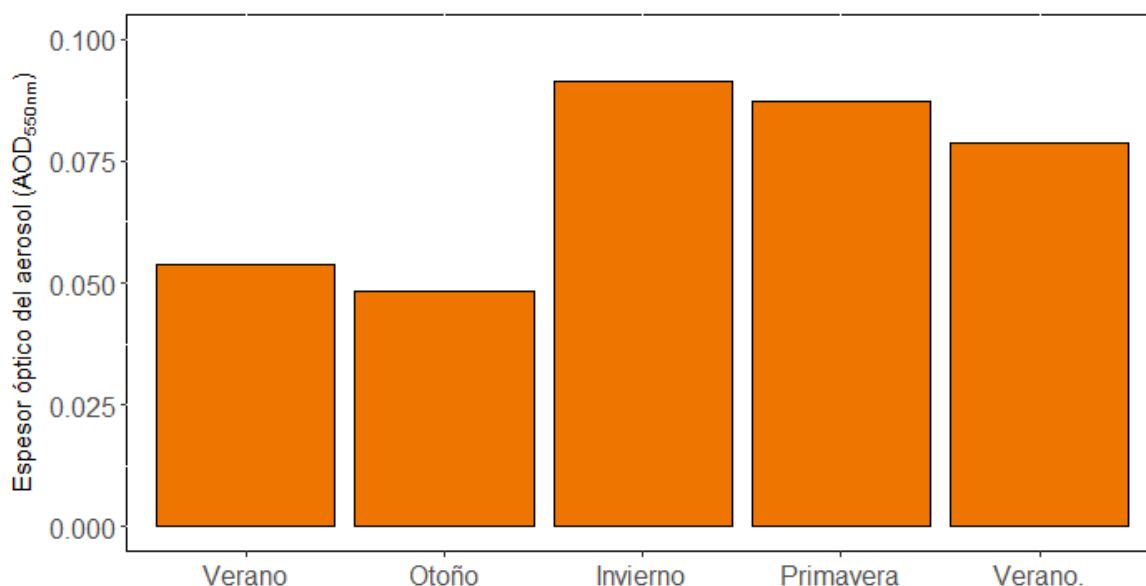


Figura 30. Media estacional del espesor óptico del aerosol procedente del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Tabla 17

Resumen de las variables estadísticas de las medias estacionales del espesor óptico del aerosol.

Variables	Mes	Promedio AOD _{550nm}	Desviación estándar
Verano	Enero - Febrero	0.0539	±0.0323
Otoño	Marzo – Abril - Mayo	0.0483	±0.0262
Invierno	Junio – Julio - Agosto	0.0914	±0.0539
Primavera	Septiembre – Octubre - Noviembre	0.0872	±0.0518
Verano	Diciembre	0.0786	±0.0307

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 30, observamos que a inicios del año (estación de verano) se presentan valores medios máximos que no exceden **0.0539**, mientras que para el régimen de otoño el espesor óptico decrece paulatinamente. Es en cambio, que para las estaciones de invierno y primavera se obtienen los mayores niveles del espesor óptico y finalmente para el mes de diciembre (verano) el valor del espesor óptico se mantiene con valores elevados y esto puede deberse a que para esta estación solo se considera un mes ya que los otros dos meses no son parte del periodo de estudio (Tabla 17).

Si analizamos la relación que hay entre el comportamiento del espesor óptico del aerosol y el agua precipitable podemos apreciar en la siguiente imagen (**Figura 31**) que entre los meses de invierno (junio, julio y agosto) y primavera (septiembre, octubre y noviembre) hubo un período con valores mínimos del agua precipitable, lo propicia el incremento del número de focos de incendio por las escasas lluvias que se puedan generar; por consiguiente, se registran mayores niveles de espesor óptico. Esto se evidencia en septiembre que fue el mes con mayor nivel de espesor óptico. Para diciembre, con el incremento del agua precipitable, los valores del espesor óptico disminuyen en comparación a los meses anteriores y esto puede deberse a la cantidad de agua precipitable potencialmente disponible para generar lluvia y provocar el proceso de sedimentación.

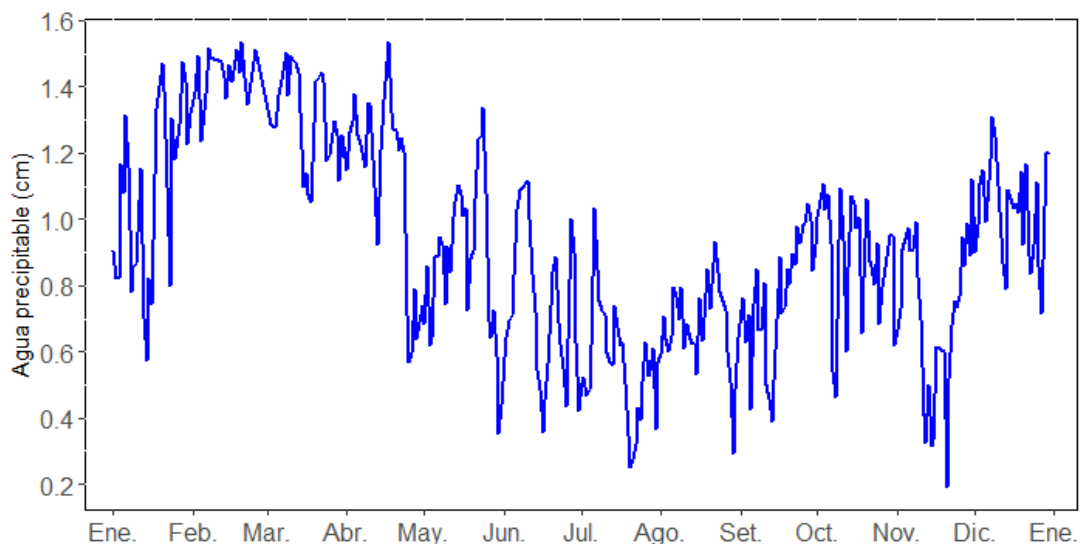


Figura 31. Variabilidad temporal del agua precipitable en cm procedentes del Observatorio de Huancayo del año 2016.

Además, si contrastamos los niveles del espesor óptico y el agua precipitable con la variabilidad mensual de la quema de biomasa nos damos cuenta que son los meses de agosto y septiembre donde se produjo la mayor cantidad de focos de calor, lo que provocaría un alto nivel del espesor óptico en el mes de septiembre debido a los focos de calor originados por las bajas precipitaciones que pueden propagarse debido a los mínimos valores registrados de agua precipitable (**Figura 32**).

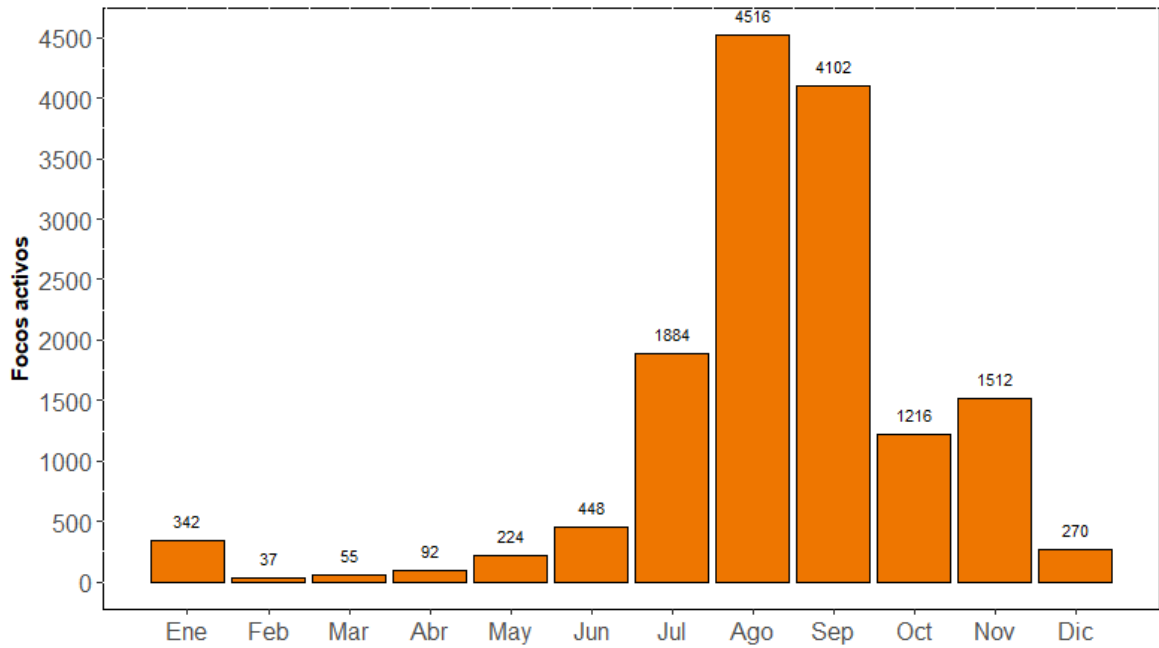


Figura 32. Media mensual de focos activos detectados por satélite en Perú del año 2016. Recuperado de http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_paises/

Caso de estudio

En el resultado de este trabajo se evidencia que el mayor valor del espesor óptico del aerosol tuvo lugar al **14 de septiembre** y si analizamos las trayectorias de las masas de aire a 500, 1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 m de altura sobre el nivel de la superficie y los focos de calor que se localizan en el área de estudio para el mismo día y además tomamos en cuenta las emisiones de PM10 generadas en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre podremos comprender la influencia de las masas de aire sobre los niveles del espesor óptico por aerosoles.

Veamos qué nos dicen las trayectorias de masas de aire calculadas con el modelo HYSPLIT generadas para alturas de llegada en la ubicación de Fotómetro solar a 500, 1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 m sobre el nivel del suelo, a las 14 horas, con datos de 6 días hacia atrás (168 horas). Una de las ventajas de hacer la dirección de la trayectoria hacia atrás es que podemos conocer la trayectoria que siguieron los contaminantes hasta llegar a la estación de monitoreo.

En la siguiente imagen (**Figura 33**), podemos observar que las masas de aire vienen del departamento de Huánuco, y que se originan a 0 m sobre el nivel del suelo (AGL) y durante todo el recorrido de la trayectoria fue ascendiendo hasta llegar al Observatorio de Huancayo a una altura de 500 metros AGL. Asimismo, observamos que la masa de aire pasó por el departamento de Pasco hasta llegar a la ciudad de Junín, que es donde se encuentra el observatorio, y durante todo el recorrido la masa de aire va recolectando las partículas suspendidas que se deben por una parte a la quema de biomasa que se genera en el mes de septiembre. Finalmente, para la semana de estudio los focos de calor para Huánuco y Pasco son 485 y 190 respectivamente.

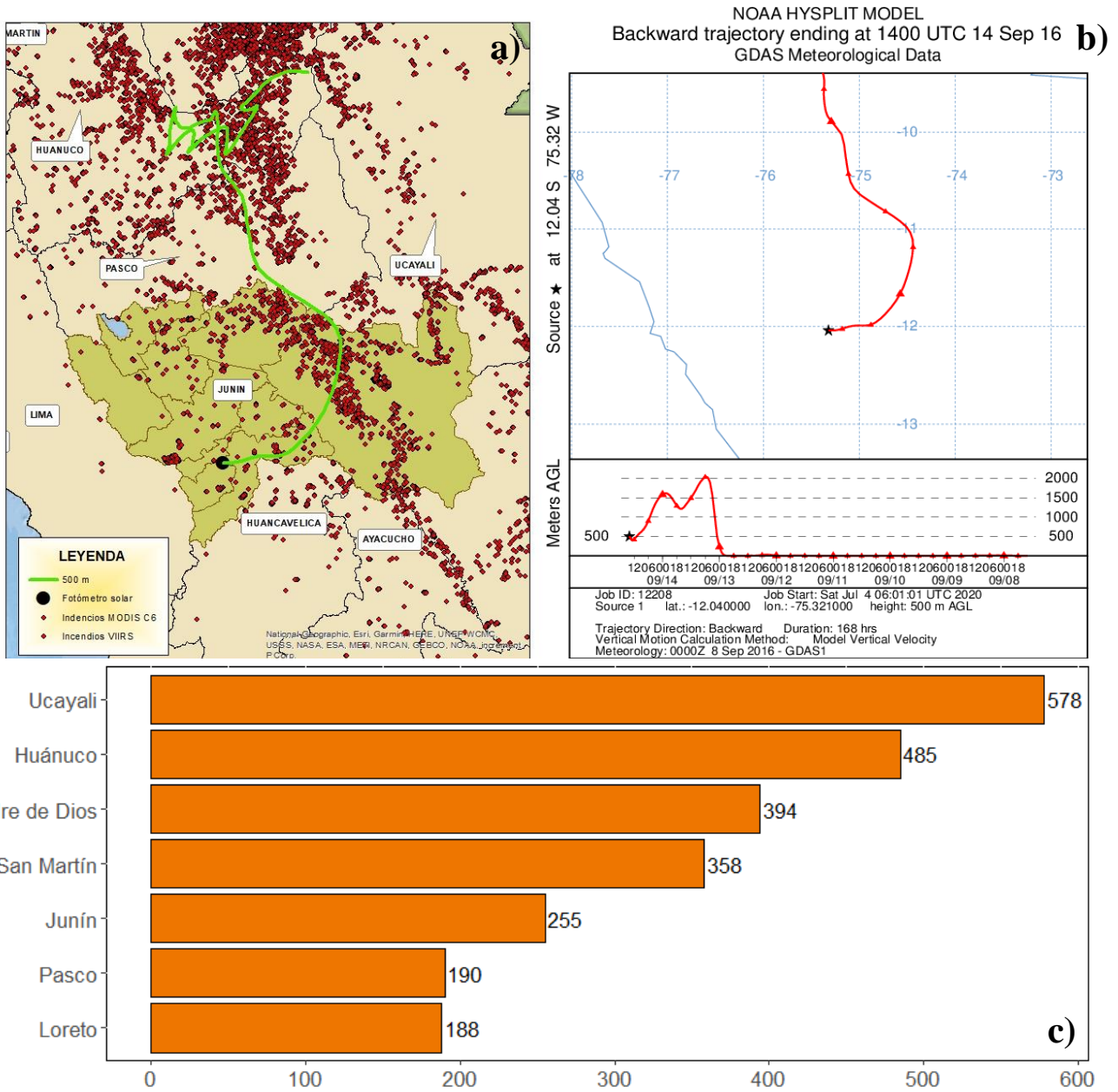


Figura 33. (a) Mapa de focos de calor detectados por los sensores MODIS y VIIRS, elaboración propia. (b) Retrotrayectoria de masa de aire del 08 al 14 de septiembre del 2016 a 500 m AGL, recuperado de <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>. (c) Focos de calor detectados por satélite del 08 al 14 de septiembre del 2016, recuperado de <http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas#>

A 1000 m, podemos ver que la trayectoria seguida por la masa de aire inició en el departamento de Loreto y recorrió por las ciudades de Huánuco y Pasco hasta llegar a Junín. Al realizar un recorrido más largo procedente de la zona selva del Perú podemos asociar que las partículas arrastradas por la masa de aire son procedentes de la quema de biomasa ya que en durante esa semana se reportan 188, 485 y 190 focos de calor en

Loreto, Huánuco y Pasco respectivamente. Además, es preciso mencionar que las masas de aire alcanzaron una trayectoria vertical superior a 1500 m AGL. Por otro lado, se aprecia que la dirección del viento cambia abruptamente al llegar al observatorio de Huancayo (**Figura 34**).

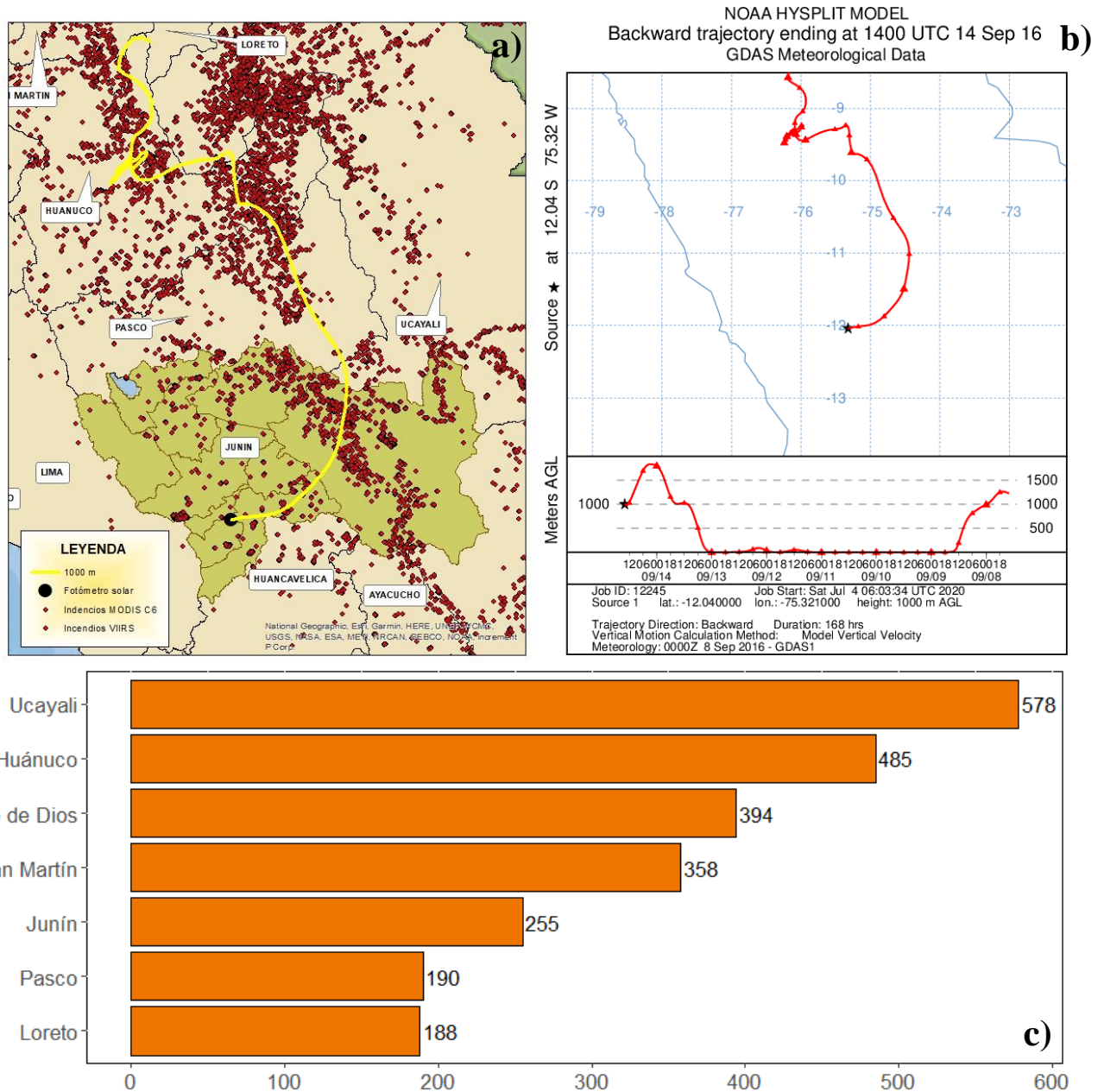


Figura 34. (a) Mapa de focos de calor detectados por los sensores MODIS y VIIRS, elaboración propia. (b) Retrotrayectoria de masa de aire del 08 al 14 de septiembre del 2016 a 1000 m AGL, recuperado de <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>. (c) Focos de calor detectados por satélite del 08 al 14 de septiembre del 2016, recuperado de <http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas#>

Para una altura de 1500 m AGL, podemos apreciar que la trayectoria toma un recorrido en el departamento Ucayali, atravesando la ciudad de Pasco, recorren cierta parte de Huánuco y regresando a Pasco para que finalmente se dirija a la ciudad de Junín. La trayectoria empieza a 0 m AGL y asciende superando los 1500 m AGL lo que nos hace pensar que podría recoger partículas durante el trayecto. Asimismo, para esa semana se reportaron 578 focos de calor en Ucayali, 485 en Huánuco y 190 en Pasco y es posible que cierta contribución a los niveles altos de espesor óptico se deba a los aerosoles de tipo biomasa (**Figura 35**).

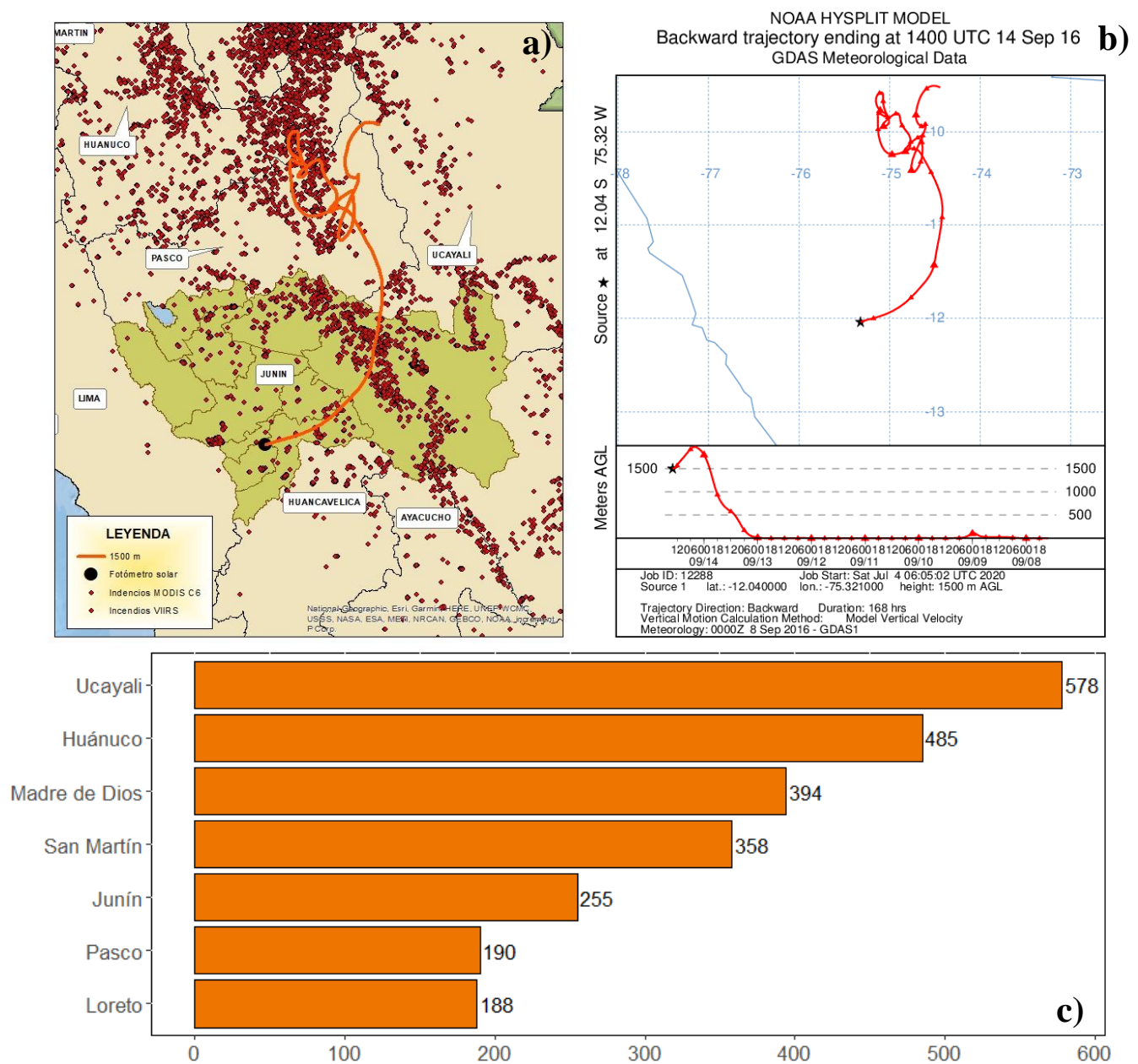


Figura 35. Mapa de focos de calor detectados por los sensores MODIS y VIIRS, elaboración propia. (b) Retrotrayectoria de masa de aire del 08 al 14 de septiembre del 2016 a 1500 m AGL, recuperado de <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>. (c) Focos de calor detectados por satélite del 08 al 14 de septiembre del 2016, recuperado de <http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas#>

A una altura de 2000 m AGL (**Figura 36**), podemos apreciar que la masa de aire viene desde Ucayali, pasa por Pasco, recorre cierta parte de Huánuco para luego regresar a Pasco y finalmente se dirige a la ciudad de Junín. El recorrido horizontal es similar a la trayectoria de 1500 AGL, mientras que el recorrido vertical empieza de 0m AGL y va ascendiendo hasta llegar a los 2000 m AGL. Este comportamiento nos hace pensar que la trayectoria podría estar arrastrando partículas pequeñas durante su recorrido.

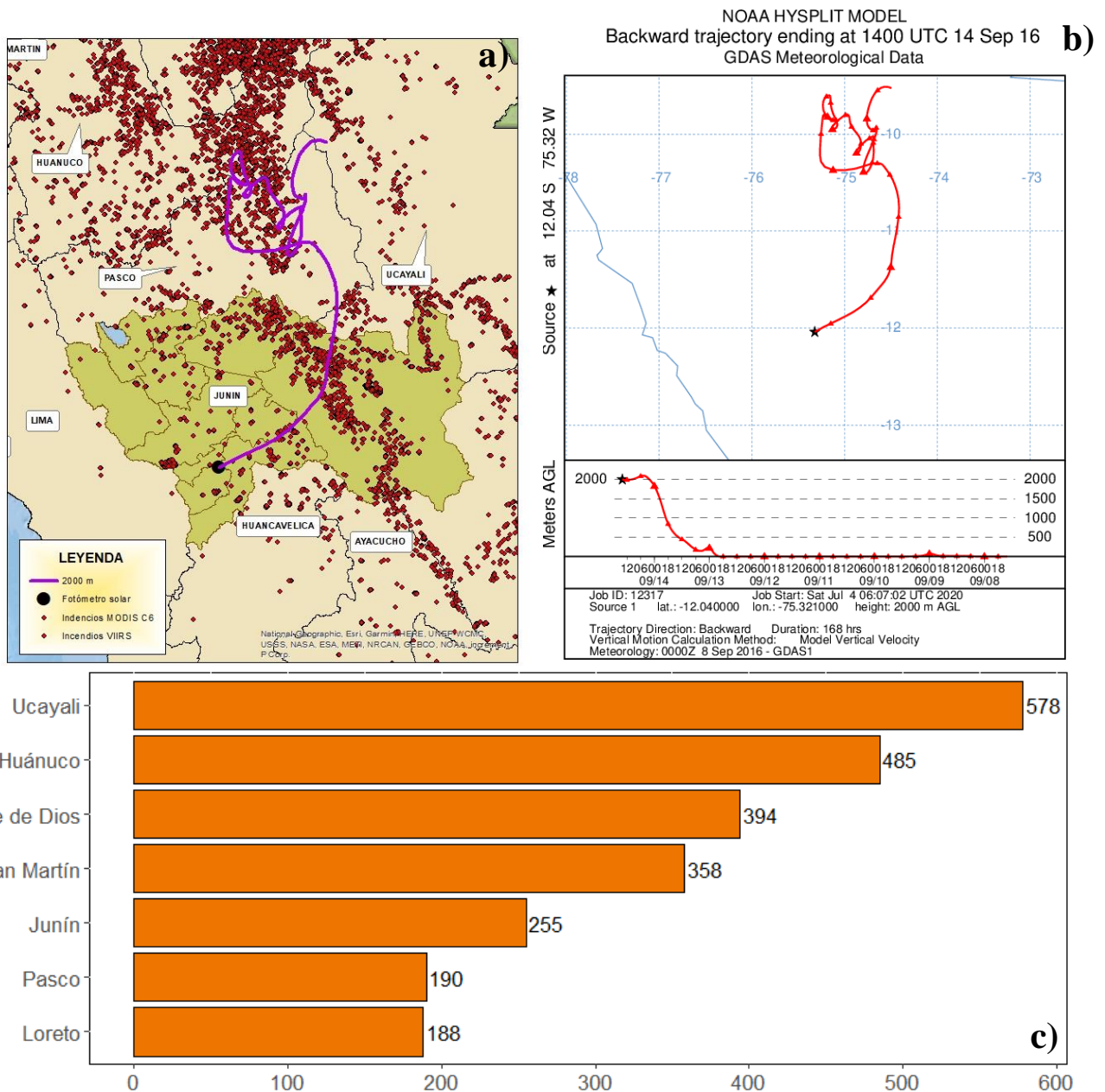
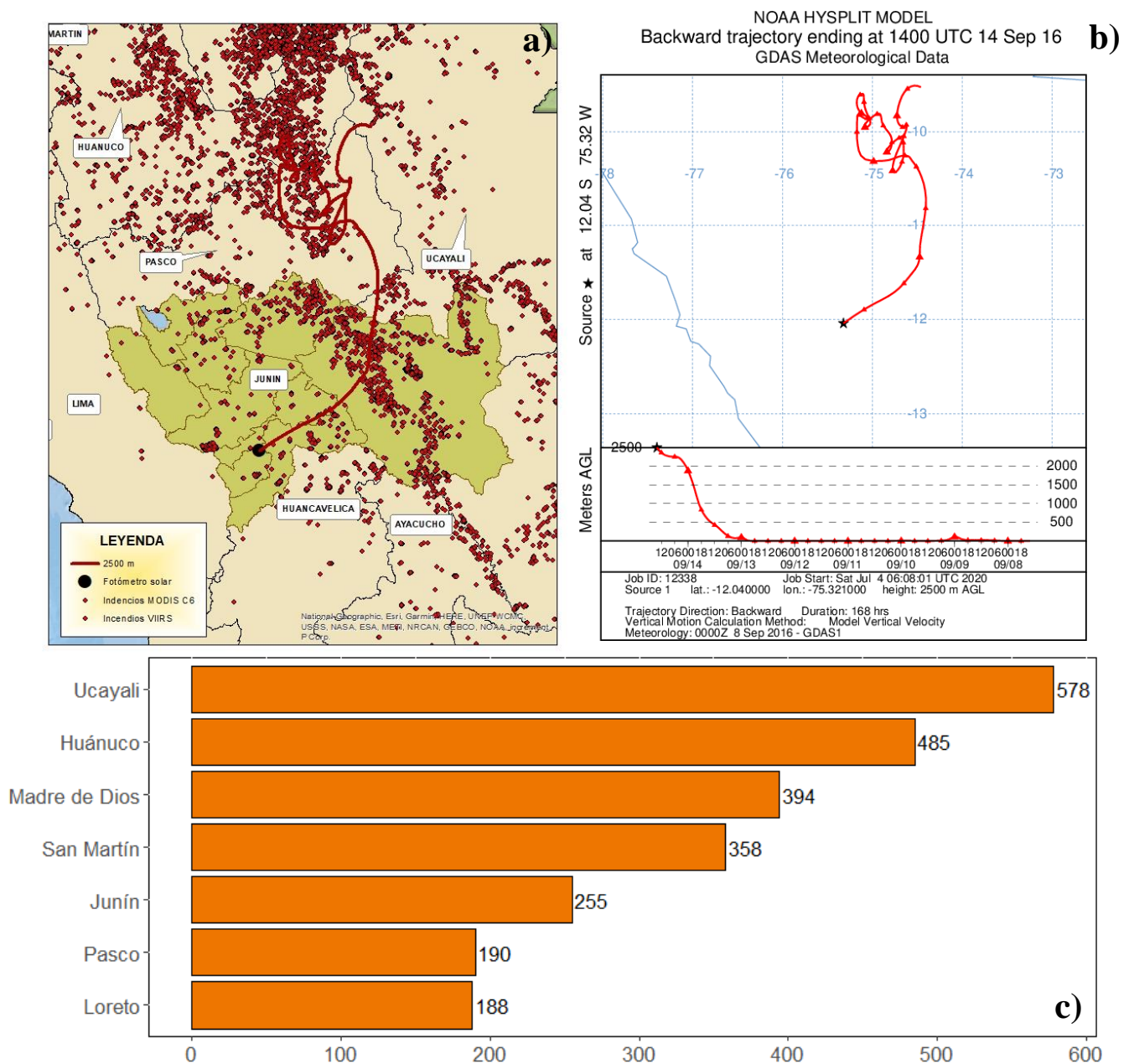


Figura 36. Mapa de focos de calor detectados por los sensores MODIS y VIIRS, elaboración propia. (b) Retrotrayectoria de masa de aire del 08 al 14 de septiembre del 2016 a 2000 m AGL, recuperado de <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>. (c) Focos de calor detectados por satélite del 08 al 14 de septiembre del 2016, recuperado de <http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas#>

Para la siguiente imagen (**Figura 37**), podemos observar que para toda la trayectoria el recorrido es muy similar a las trayectorias de 1500 m y 2000 m AGL. Además, la trayectoria empieza a los 0 m AGL y pasa por la ciudad de Pasco, Huánuco para luego retornar a Pasco e ir finalmente a la ciudad de Junín. Durante el trayecto podemos observar los focos de calor durante esa semana así que es posible que la masa de aire arrastre partículas de biomasa.



Finalmente, en la **Figura 38** se muestra una trayectoria que empieza en el departamento de Ucayali a una altitud de 0 m AGL, que pasa por la ciudad de Huánuco, Pasco y continua su recorrido hasta llegar a la ciudad de Junín. Por último, al igual que las anteriores trayectorias los valores altos del espesor óptico del aerosol se ven fuertemente influenciados debido a los focos activos registrados para el mes de septiembre por MODIS C6 y VIIRS. Los cuales se pueden contrastar con las estadísticas del Instituto Nacional de Investigaciones espaciales (INPE) que reporta los incendios forestales detectados para los departamentos que recorrió la trayectoria.

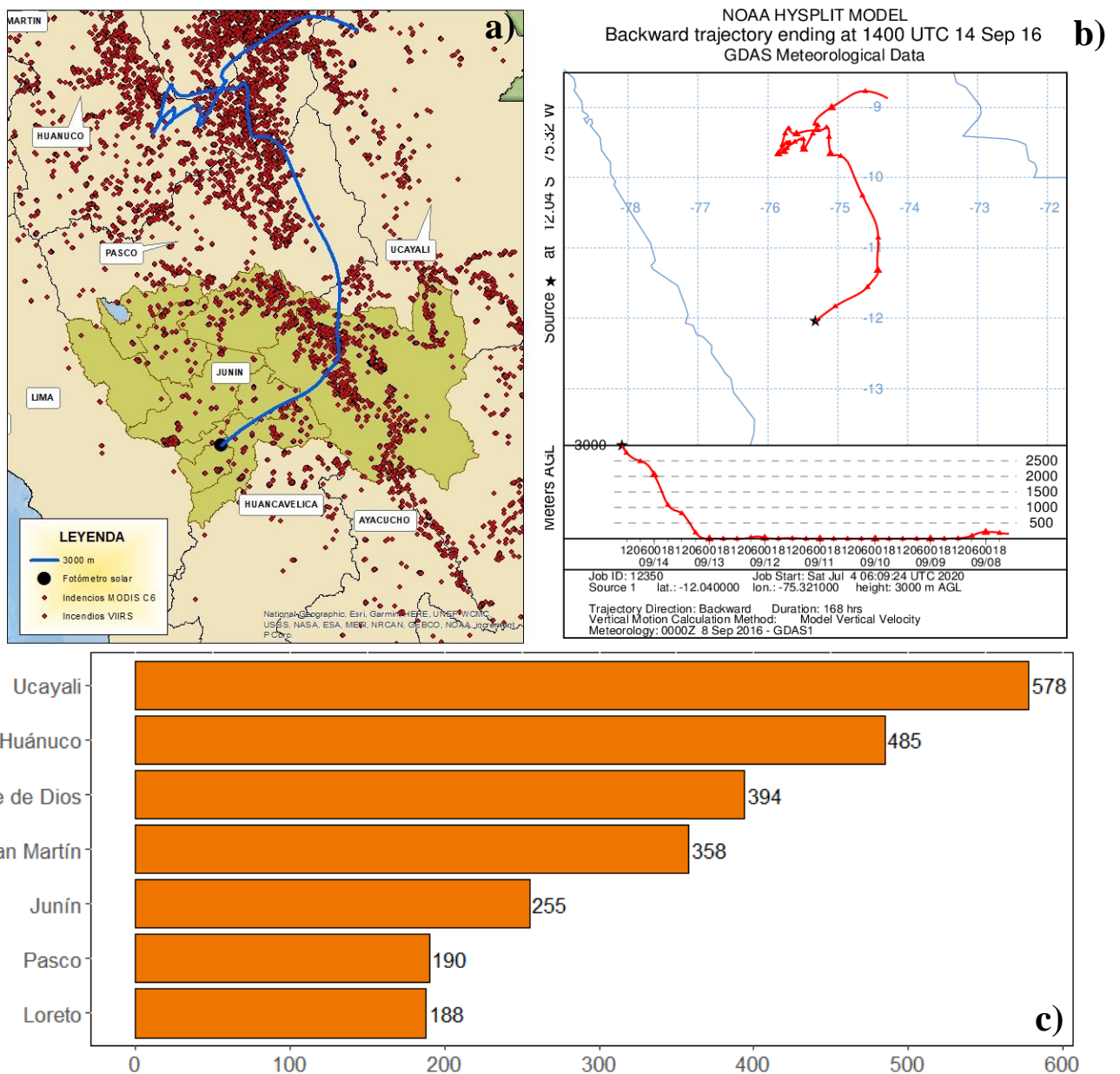


Figura 38. Mapa de focos de calor detectados por los sensores MODIS y VIIRS, elaboración propia. (b) Retrotrayectoria de masa de aire del 08 al 14 de septiembre del 2016 a 3000 m AGL, recuperado de <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>. (c) Focos de calor detectados por satélite del 08 al 14 de septiembre del 2016, recuperado de <http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas#>

Para una mejor apreciación, se realizó una representación de las retrotrayectorias a diferentes alturas desde el 08 al 14 de septiembre del periodo de estudio (**Figura 39**). Claramente podemos observar que durante el recorrido las masas de aire tuvieron puntos coincidentes y por ende arrastraron partículas de biomasa vinculados a fuegos forestales según las estadísticas reportadas por el (INPE).

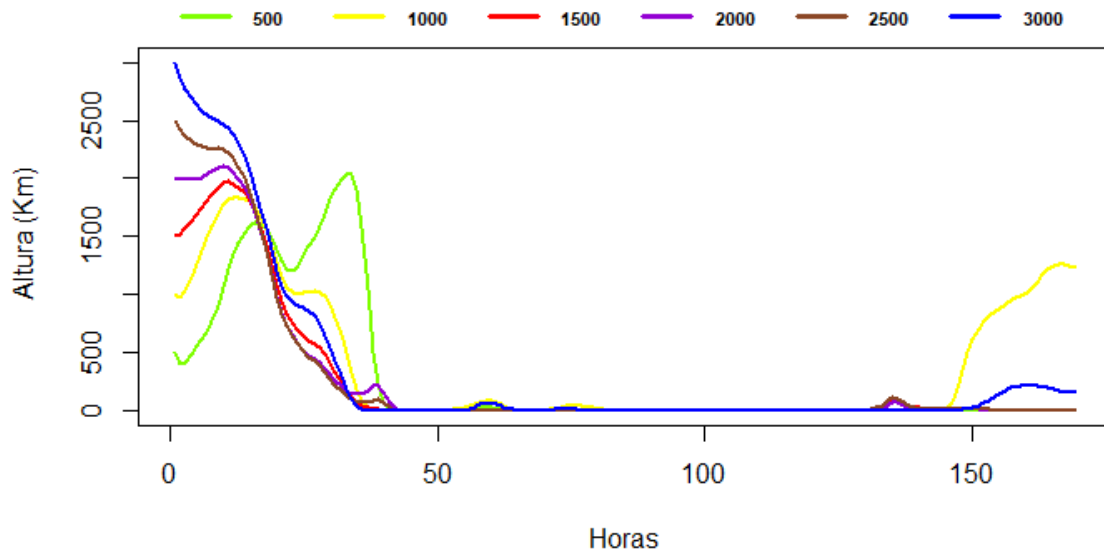


Figura 39. Retrotrayectorias de masas de aire a 500, 1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 m AGL para 168 horas desde el 14 de septiembre de 2016. Elaboración propia.

Adicionalmente, para poder contrastar que los niveles altos del espesor óptico tienen contribución por aerosoles de quema de biomasa el Instituto Geofísico del Perú (Dr. Rene Estevan) empleó el modelo WRF-CHEM, modelo de pronóstico e investigación del tiempo con un modelo que junto con la química que permite estimar las concentraciones de material particulado. Para el caso de PM10, a partir de información de quema de biomasa (puntos de incendios) que adicionalmente añadiendo información meteorológica se obtiene la representación de la cantidad de partículas suspendidas en la atmósfera, y a simple vista observamos que es septiembre el mes donde se registra mayor cantidad de partículas suspendidas en la atmósfera y esto coincide con los resultados que se mostraron anteriormente medidos por el fotómetro (**Figura 40**).

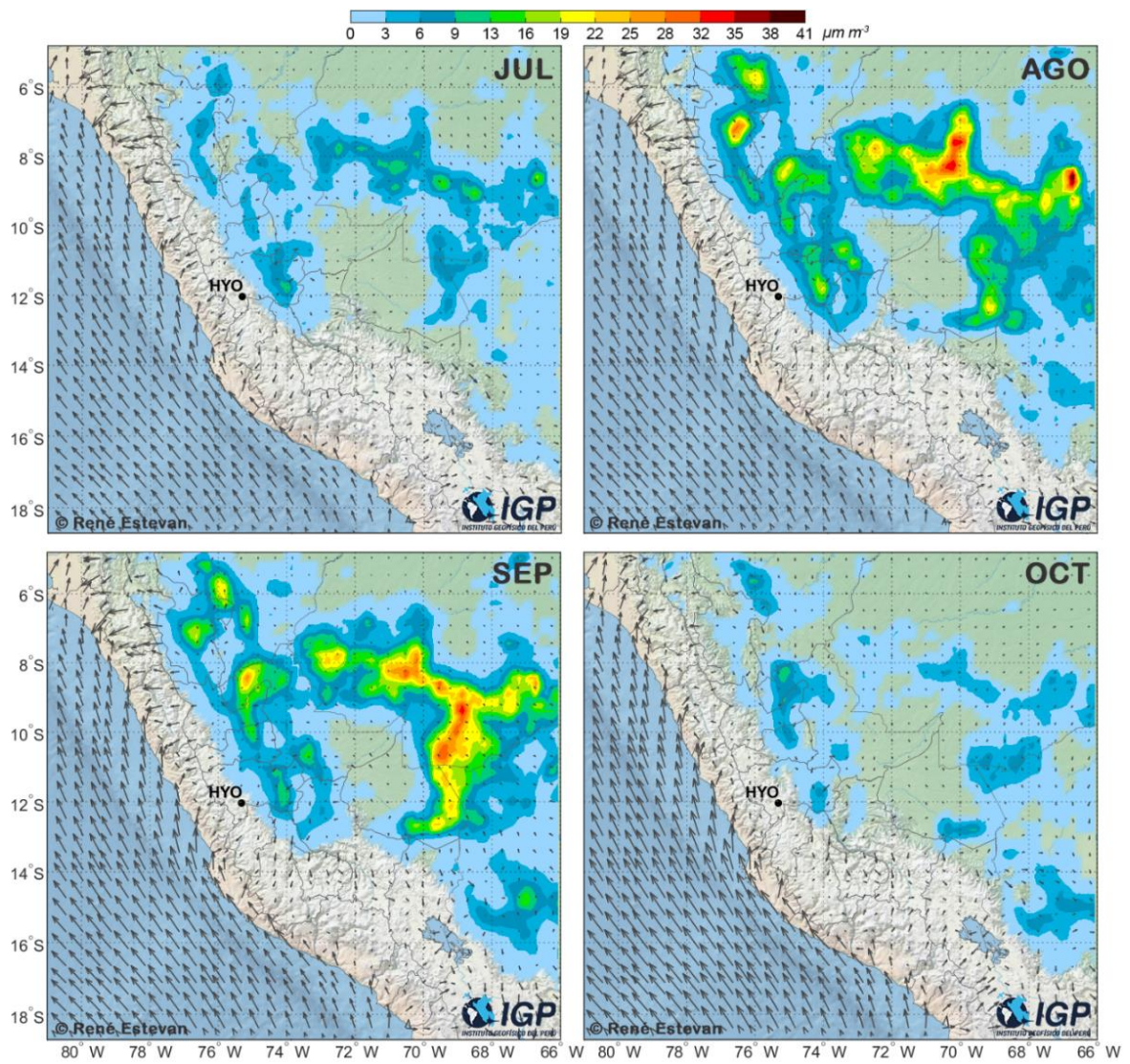


Figura 40. Modelo de pronóstico e investigación del tiempo con un modelo que química que permite estimar las concentraciones de material particulado (PM10). Elaborado por el Dr. René Estevan (investigador del Instituto Geofísico del Perú).

4.6.3. Análisis de la variación de la distribución del tamaño de los aerosoles atmosféricos medidos con el fotómetro solar CIMEL en la ciudad de Huancayo para el año 2016.

Finalmente, se presenta los resultados del objetivo 3:

La siguiente imagen (**Figura 41**), muestra los valores promedios de la distribución del tamaño de volumen de aerosol para el periodo analizado. La distribución contiene un carácter bimodal con un ligero predominio del modo grueso (partículas grandes). Las partículas gruesas presentan un diámetro aerodinámico mayor a $2.5 \mu\text{m}$ y menor a $10 \mu\text{m}$, mientras que las partículas finas cuentan con un diámetro aerodinámico menor a $2.5 \mu\text{m}$.

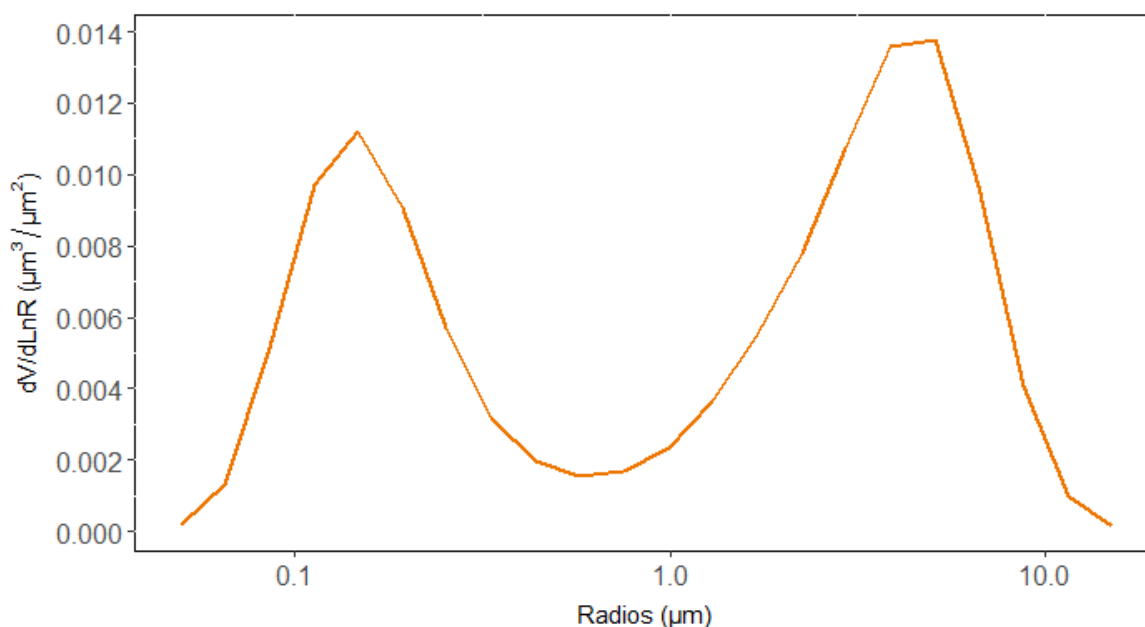


Figura 41. Distribución del tamaño del aerosol atmosférico. Elaboración propia.

De igual manera, como se sabe existe una relación inversa entre el parámetro de angstrom y el espesor óptico del aerosol lo que nos indica que a menores medidas del parámetro de angstrom las partículas son más grandes mientras que partículas pequeñas tienen mayores niveles de angstrom (**Figura 42**).

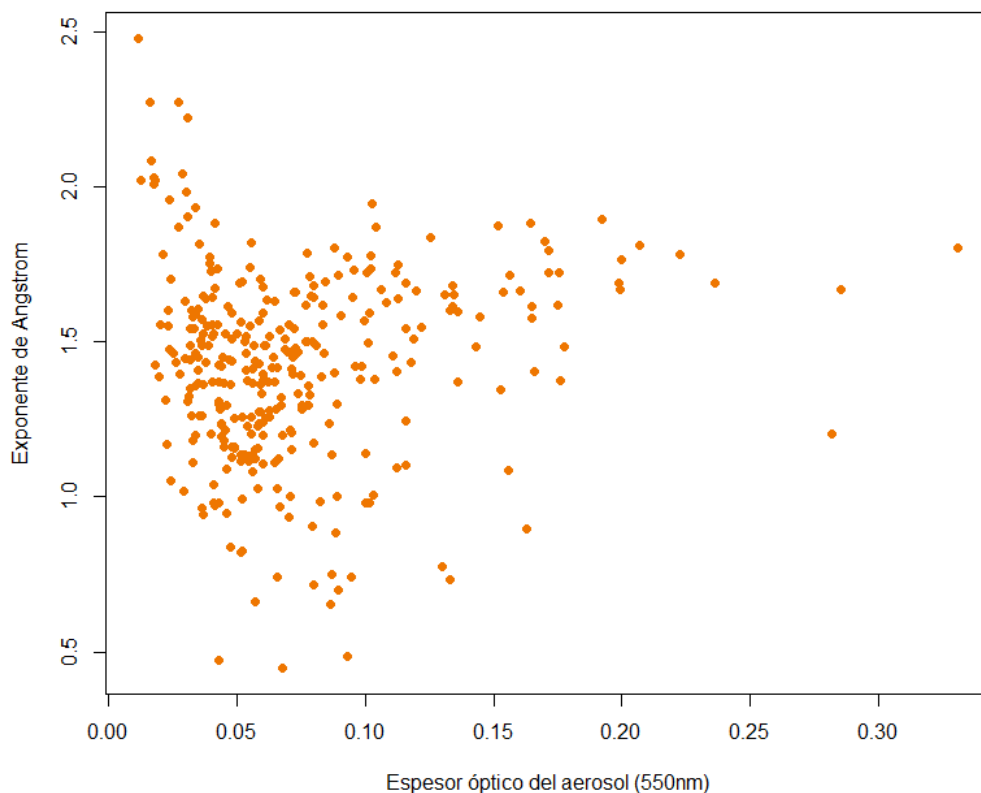


Figura 42. Diagrama de dispersión de la profundidad óptica del aerosol (550 nm) frente al parámetro de angstrom (440 a 870 nm)

Si tomamos los datos horarios, todos los puntos, del espesor óptico y del coeficiente de angstrom podemos clasificar los aerosoles debido a la dependencia espectral del coeficiente de angstrom (α) ya que este parámetro guarda relación con la distribución del tamaño del aerosol.

Para clasificar los aerosoles, se tomó en cuenta los rangos del AOD y α definidos por (Núñez Romero, 2017). Para ello, se construyó un diagrama de dispersión donde se identifican 6 tipos de aerosoles para Huancayo: Continental (CNT) provenientes de sustancias solubles en agua y partículas minerales típico de zonas alejadas de fuentes de contaminación (Pesantez, 2013), los de tipo Marítimo (MAR) provenientes de la Amazonia (Angeles Vásquez & Angeles, 2017), tipo Contaminado (CDO) compuestos básicamente por especies carbonáceas, las mismas que forman parte de los aerosoles generados como consecuencia de la quema de biomasa (Moya Álvarez, Arredondo, & Yuli Posadas, 2017), tipo Mezcla (MEZ) mezcla de partículas de diferentes orígenes (Hess, Koepke, & Schult, 1998) entre los aerosoles de biomasa y polvo (Estevan, Martínez Castro, Suarez Salas, Moya, & Silva, 2019), el tipo Polvo (POL) arrastrado a

la atmósfera por el viento creado por el pastoreo excesivo, la deforestación, el drenaje de los cuerpos de aguas continentales, algunas prácticas de explotación agraria (Pesantez, 2013) y periodos de preparación de la tierra (Estevan, Martínez Castro, Suarez Salas, Moya, & Silva, 2019). Por último, los aerosoles de tipo Biomasa (BIO) producido por bosques e incendios de pastizales (Dubovik, y otros, 2002),

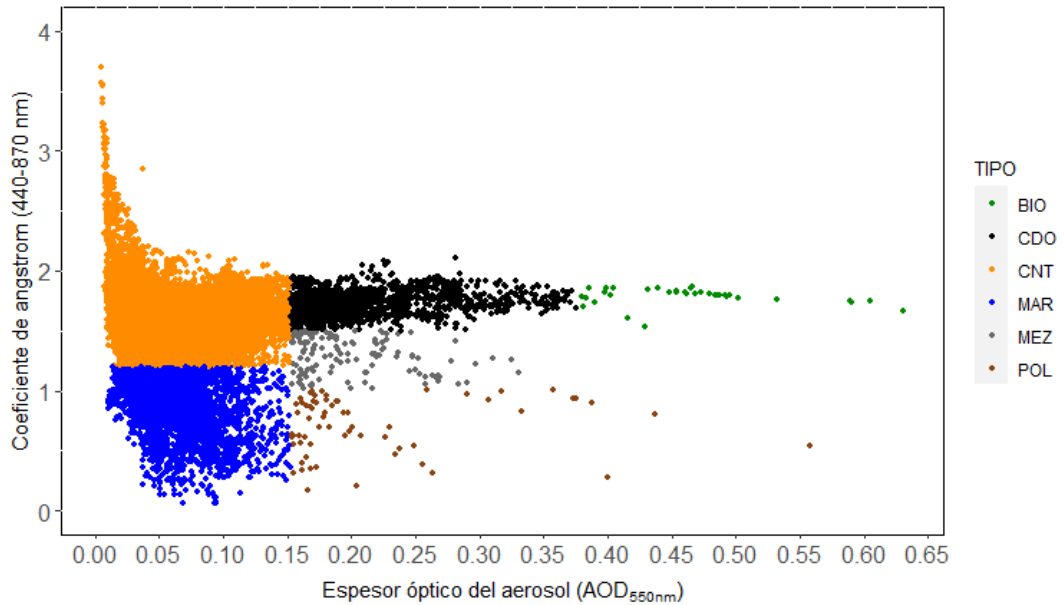


Figura 43. Tipos de aerosoles identificados en el periodo de estudio en Huancayo

El aerosol con mayor predominancia corresponde a aerosoles de tipo continental (CNT) con 70.91%, el segundo tipo de aerosol más registrado es el de tipo marítimo (MAR) con 20.73%, seguidamente el de tipo contaminado (CDO) con 7.32%, y los de tipo mezcla (MEZ), polvo (POL) y biomasa (BIO) con 0.60%, 0.28% y 0.16% respectivamente (**Figura 44**).

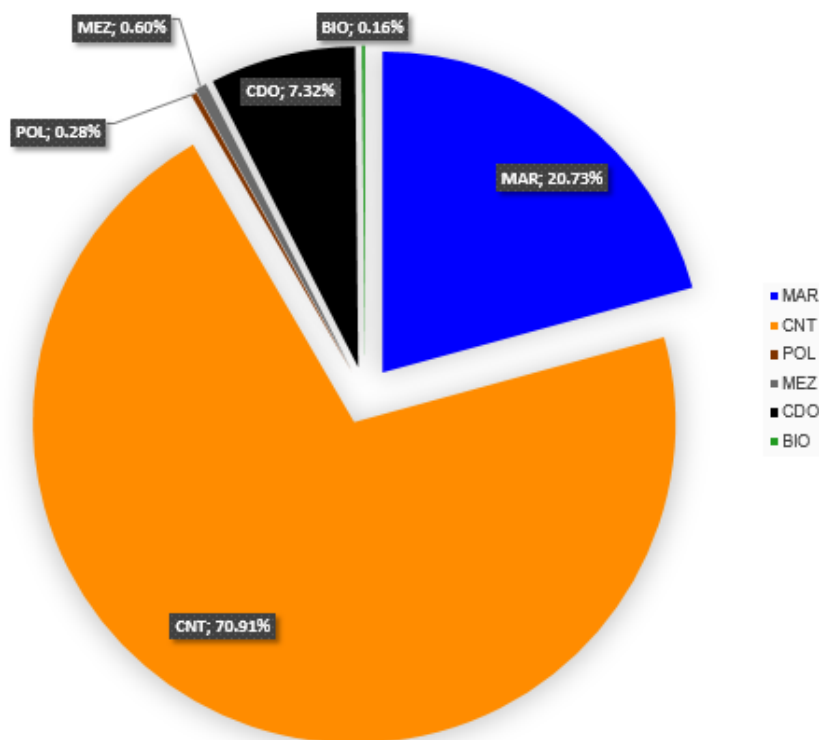


Figura 44. Porcentaje de aportación por tipo de aerosol.

Al identificar los tipos de aerosoles y relacionándolo con los tamaños de los aerosoles se revela una preponderancia de partículas grandes asociadas a modo grueso que corresponden a aerosoles marítimos (MAR) y de polvo (POL). Mientras que las partículas pequeñas correspondientes al modo fino, relacionadas con aerosoles continentales (CNT), de biomasa (BIO) y contaminadas (CDO).

Si analizamos claramente los datos en una serie temporal observamos que durante todo el año predominan los aerosoles de tipo continental (CNT) y seguidamente los de tipo marítimo (MAR); por lo que, podríamos decir que son considerados como aerosoles de fondo (**Figura 45**).

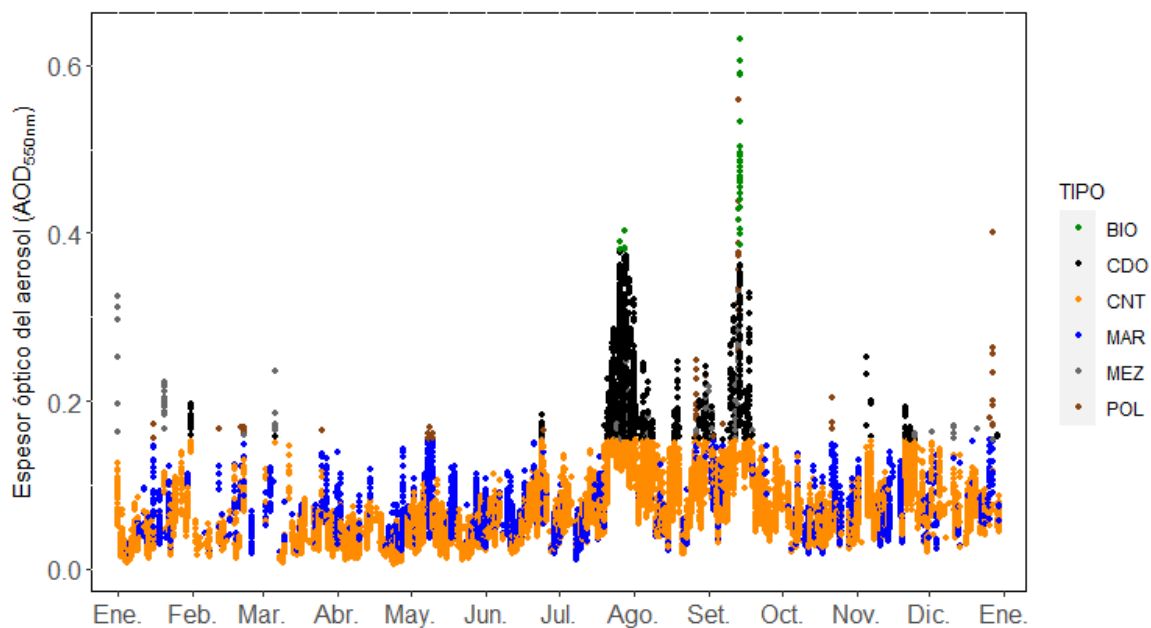


Figura 45. Variabilidad horaria del espesor óptico del aerosol identificando los tipos de aerosoles.

Mientras que en julio, agosto y septiembre se distingue un aporte de los aerosoles de tipo contaminado (CDO), aerosoles relacionados con la quema de biomasa, son aquellos meses en donde se detectan focos activos en la zona amazónica del Perú. Para los aerosoles de tipo biomasa (BIO) se identifica su presencia en el mes septiembre. Se identifica la presencia de los aerosoles de tipo polvo (POL) en los meses de enero, febrero, marzo, mayo junio, agosto, septiembre, octubre y diciembre. Para el aerosol de tipo mezcla (MEZ) se registra su presencia en todos los meses excepto para abril, mayo y octubre (**Figura 46**). De igual manera se pueden verificar los porcentajes de aportes por tipo de aerosol en la Tabla 18.

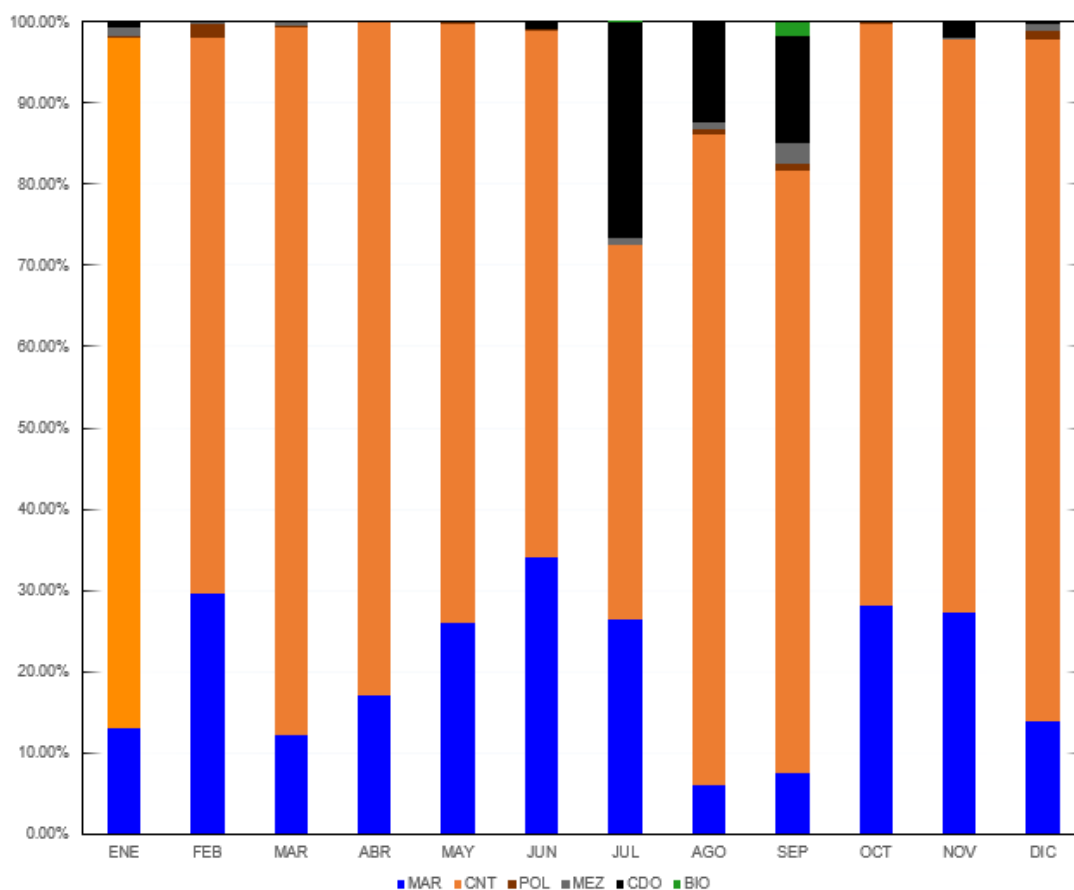


Figura 46. Aporte mensual de los tipos de aerosoles durante el año 2016 en Huancayo.

Tabla 18

Aporte porcentual de los tipos de aerosoles para cada mes del año 2016.

MESES	n	MAR	CNT	POL	MEZ	CDO	BIO
ENE	1680	13.04%	85.12%	0.12%	1.01%	0.71%	0.00%
FEB	405	29.63%	68.40%	1.73%	0.25%	0.00%	0.00%
MAR	1057	12.11%	87.23%	0.09%	0.47%	0.09%	0.00%
ABR	1629	17.13%	82.87%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
MAY	2760	26.05%	73.62%	0.33%	0.00%	0.00%	0.00%
JUN	2540	34.09%	64.88%	0.04%	0.04%	0.94%	0.00%
JUL	3840	26.51%	46.09%	0.00%	0.86%	26.41%	0.13%
AGO	2740	6.06%	80.07%	0.69%	0.73%	12.45%	0.00%
SEP	1767	7.47%	74.25%	0.74%	2.60%	13.19%	1.75%
OCT	1257	28.08%	71.68%	0.24%	0.00%	0.00%	0.00%
NOV	2191	27.34%	70.47%	0.00%	0.23%	1.96%	0.00%
DIC	956	13.91%	83.89%	1.05%	0.84%	0.31%	0.00%
N	22822						

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Según el presente estudio, los mayores valores de medias diarias del espesor óptico se obtuvieron en el mes de septiembre, mientras que los menores valores se registraron en el mes marzo y abril. Para el estudio de (Angeles Vásquez R. J., 2019) se determinó que para una longitud de onda de 500nm se registraron los mayores valores en el mes septiembre del 2016 y los menores valores los meses de abril, mayo, junio y julio. Mientras que para (Núñez Romero, 2017) el espesor óptico a una longitud de 440nm se registró los menores valores en los meses de marzo, abril y mayo, considerando que en este último estudio solo se evaluó el primer semestre del 2016.

Para el caso de la variabilidad mensual del espesor óptico a 550nm se presentó niveles bajos desde el mes enero hasta mayo, y es a partir de junio que los valores aumentan progresivamente llegando a valores máximos el mes de septiembre. Seguidamente, en el mes de octubre la media mensual disminuye significativamente; finalmente, para los meses de noviembre y diciembre los valores aumentan, pero se mantienen relativamente constantes. Para (Núñez Romero, 2017) el espesor óptico del aerosol a 500nm los meses que tuvieron menores valores fueron febrero y abril.

La variabilidad estacional del espesor óptico del aerosol a 550nm es caracterizada por mayores valores del espesor óptico en las estaciones de invierno, primavera y verano, este último solo abarca solo el mes de diciembre, con un nivel de agua precipitable bajo para las estaciones de invierno y primavera. Este comportamiento del AOD se debe principalmente a la quema de biomasa en esa temporada. En el caso de (Núñez Romero, 2017) concluye que para para el 2016 se duplican los focos de incendio con respecto al año 2015 lo que causó mayores niveles de espesor óptico que el año anterior.

Con respecto a la distribución de tamaños del periodo de estudio se obtuvo una distribución bimodal predominando el modo grueso. Adicionalmente al caracterizar los tipos de aerosoles se identificaron 6 tipos de aerosoles como son los de tipo continental, marítimo, contaminado, polvo, mezcla y biomasa, en ese orden de aporte. Del mismo modo, el estudio

realizado por (Estevan, Martínez Castro, Suarez Salas, Moya, & Silva, 2019) concluye que en la distribución de tamaños de los aerosoles existe una predominancia por los de modo fino considerando que el periodo de estudio de este trabajo incluye el año 2015 hasta agosto del 2017 en el cual identificó 6 tipos de aerosoles los cuales son continental, biomasa, urbano, marítimo, polvo y mezcla, en ese orden de aporte.

VI. CONCLUSIONES

- El coeficiente de correlación obtenido para el instrumento MODIS a bordo del satélite TERRA y AQUA fue de 0.62 y 0.44 respectivamente. Además, con un RMSE y BIAS de 0.08 y -0.04 para TERRA; y, 0.06 y -0.03 para AQUA. Lo que nos indica claramente que existe cierta subestimación por parte del instrumento MODIS en ambos casos.
- Se registra que los valores de las medias diarias del espesor óptico del aerosol a 550nm presentan un aumento desde el mes agosto llegando a un máximo en el mes de septiembre. El mayor valor de la variabilidad diaria fue registrado el 14 de septiembre con **0.3309** el cual se da debido a los focos activos de la quema de biomasa registrados en ese mes, en las ciudades de procedencia de las retrotrayectorias de parcelas del aire calculadas. Para el caso de la variabilidad mensual se obtuvo los mayores valores en los meses de julio, agosto, septiembre con **0.1094±0.0691**, **0.1017±0.0459** y **0.1186±0.0651** respectivamente; mientras, que el valor mínimo fue en el mes de abril con **0.0379±0.0160**. Estacionalmente, son las estaciones de invierno, primavera y verano en las que se registra mayores niveles de espesor óptico, en orden descendente, que coincidentemente son los meses de junio, julio y agosto que abarca la estación de invierno y los meses de septiembre, octubre y noviembre que abarca la estación de primavera con mayores niveles de AOD y escasos niveles de agua precipitable y un aumento de los focos activos registrados para junio con 448, julio con 1884, agosto con 4516, septiembre con 4102, octubre 1216 y noviembre con 1512. Lo que claramente nos indica que los principales aportes de los altos niveles de AOD para las estaciones de invierno, primavera y verano, solo el mes de diciembre para este último, se debe a los incendios forestales de la Amazonía.
- Los aerosoles predominantes en el periodo de estudio son los de modo grueso entre los cuales se identificó a los aerosoles marítimos (MAR) con 20.73% y de polvo (POL) con 0.28%. Seguidamente se tiene a las partículas en modo fino (partículas pequeñas) relacionadas con aerosoles continentales (CNT) con 70.91%, de biomasa (BIO) con 0.16% y de tipo contaminado (CDO) con 7.32%. Por último, se identificó a las partículas de tipo

mezcla (0.60%) que pertenecen básicamente a la transición de los aerosoles de tipo biomasa y polvo.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio . (s.f.). *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*. Obtenido de Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/components.php>
- Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio. (2009). Obtenido de <https://www.nasa.gov/subject/3133/land/>
- Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio. (2000). *Aerosol Robotic Network*. Recuperado el 2 de Marzo de 2019, de Aerosol Robotic Network: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- Alegría, D. L. (2015). *Propiedades microfísicas de los aerosoles troposféricos derivadas de medidas de fotómetro solar y Lidar en el Valle de Aburrá*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Recuperado el 18 de Febrero de 2019, de <http://www.bdigital.unal.edu.co>
- Alonso-Blanco, E., Calvo, A. I., Fraile, R., & Castro, A. (2012). The Influence of Wildfires on Aerosol Size Distributions in Rural Areas. *The Scientific World Journal*, 2012, 13. doi:<https://doi.org/10.1100/2012/735697>
- Ángeles Suazo, J. (2013). Determinación del espesor óptico de aerosol en la Estación Antártica Peruana Machu Picchu. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 3(1), 16-25. doi:10.18259/acs.2013003
- Angeles Vásquez, R. J. (2019). *Efecto de las propiedades físicas de los aerosoles atmosféricos en el equilibrio energético en la Provincia de Huancayo*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú. Recuperado el 1 de Mayo de 2020, de <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/5199>
- Angeles Vásquez, R., & Angeles, J. (2017). Impacto del transporte transfronterizo de aerosoles atmosféricos debido a la quema de vegetación en la amazonia sobre la Región Andina del Perú. *Prospectiva universitaria*, 55-75. Recuperado el 3 de Septiembre de 2020, de <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/4691>
- Arellano, E. J. (2011). *Evaluación de aerosoles troposféricos del AMCM por medio de imágenes de satélite GOES*. Tesis de maestría, México, D.F. Recuperado el 15 de Diciembre de 2018, de <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/>

- Bilal, M., E. Nichol, J., & Nazeer, M. (2016). Validation of Aqua-MODIS C051 and C006 Operational Aerosol Products Using AERONET Measurements Over Pakistan. *in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(5), 2074-2080. doi:10.1109/JSTARS.2015.2481460
- Burgos, M. Á. (2016). *Estudio de las propiedades en columna y superficie del aerosol atmosférico en la zona centro-norte de la Península Ibérica: énfasis en aerosol desértico*. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, España. Recuperado el 15 de Abril de 2019, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=155380>
- Calderón, P. E. (2018). *Influencia del transporte de concentración de PM10 en el espesor óptico de los aerosoles de la ciudad de Huancayo en el año 2015-2016*. Tesis de Pregrado, Universidad Continental, Huancayo, Perú. Recuperado el 12 de Marzo de 2019, de <https://repositorio.continental.edu.pe/>
- Cantón, L., Barrero, M. Á., Blázquez, E., & Inza, A. (2004). *Estudio de la Composición de los aerosoles urbanos/industriales*. Universidad del País de Vasco. Recuperado el 22 de Marzo de 2019, de <http://www.muskiz.org/es-ES/Servicios/Medio-Ambiente/Publicaciones%20%20Estudios%20de%20calidad%20del%20aire/2004.pdf>
- Carrillo, G. J., & Marin, M. R. (2007). *Repositorio Institucional de la Universidad del Centro del Perú*. Obtenido de Repositorio Institucional de la Universidad del Centro del Perú: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/212>
- Cholan, E. (2016). *istribución espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles y del monóxido de carbono en el Perú relacionado con las quemas de biomasa (2002-2014)*. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Recuperado el 15 de Marzo de 2019, de <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/5664?show=full>
- Comisión Técnica Regional de Junín. (2015). *Memoria descriptiva del estudio climático y zonas de vida del departamento de Junín a escala 1:100000*. Recuperado el 21 de Marzo de 2019, de http://siar.regionjunin.gob.pe/sites/default/files/archivos/public/docs/medio_fisico_-_memoria_climas_y_zonas_de_vida.pdf

- Cortés, V. E., & Aparicio, J. (Enero-Febrero de 2014). Caracterización de Aerosoles por quema de biomasa en el sureste de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, V(1), 145-156. Recuperado el 12 de Marzo de 2019
- Da Cruz Martins, P. A. (2011). *Medição e modelação do aerossol atmosférico em Cabo Verde*. Tesis de Maestría, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. Recuperado el 19 de Febrero de 2019, de <https://ria.ua.pt/handle/10773/8601>
- Delgado, M. (2001). *Estudio correlativo de la concentración de elementos tóxicos con el tamaño de partículas en el aire ambiental*. Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Materiales Avanzados , Chihuahua, México. Recuperado el 6 de Junio de 2019, de <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/414>
- Della, L. S. (2018). *Análisis espacio-temporal de la distribución de aerosoles atmosféricos en la ciudad de Córdoba (Argentina) y desarrollo de un modelo predictivo de los niveles de material particulado*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. Recuperado el 25 de Junio de 2019, de <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/6009>
- Dirección General de Salud Ambiental. (2004). *Evaluación de la Calidad de Aire en la Ciudad de Huancayo - Junín*. Recuperado el 12 de Marzo de 2019, de <http://www.digesa.minsa.gob.pe/depa/pral2/mpca-informes/HUANCAYO%202004.pdf>
- Dirección General de Salud Ambiental. (2006). *Inventario de emisiones de la Cuenca atmosférica de la Ciudad de Huancayo*. Obtenido de http://www.digesa.minsa.gob.pe/depa/inventario_aire/fuentes_fijas/Informe%20Inventario%20Integrado%20Oroya%20-%20Huancayo.pdf
- Dubovik, O., Holben, B., Eck, T., Smirnov, A., Kaufman, Y. J., King, M., . . . Slutsker, I. (2002). Variabilidad de las propiedades ópticas y de absorción de los principales tipos de aerosoles observados en ubicaciones en todo el mundo. *Revista de Ciencias Atmosféricas*, 59(3), 590-608. doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059<0590:VOAOP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<0590:VOAOP>2.0.CO;2) .
- Dutra, R. (2015). *Relação entre a profundidade ótica dos aerossóis e a radiação solar incidente em área do cerrado Mato-Grossense*. Tesis de Maestría, Universidade de

- Cuiabá, Cuiabá, Brasil. Recuperado el 20 de Mayo de 2019, de <https://repositorio.pgsskroton.com//handle/123456789/606>
- Efficacia Legal. (Febrero de 2018). Aerosoles Atmosféricos. *Efficacia Legal*, 9. Recuperado el 23 de Febrero de 2019, de www.effleg.com
- Escribano, A. J. (2012). *Capa límite, reflectancia y espesor óptico de aerosoles sobre Santiago*. Tesis de pre grado, Santiago de Chile. Recuperado el 17 de Diciembre de 2018, de <http://repositorio.uchile.cl/>
- Espen, K., Lund, C., & Torseth, K. (2009). Los Aerosoles Carbonosos un desafío pendiente. *Boletín - Organización Meteorológica Mundial*, 54-60. Recuperado el 2 de Marzo de 2019, de <https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/226208>
- Estevan, R., Martínez Castro, D., Suarez Salas, L., Moya, A., & Silva, Y. (2019). First two and a half years of aerosol measurements with an AERONET sunphotometer at the Huancayo Observatory, Peru. *Atmospheric Environment: X*, 3(100037). doi:<https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100037>
- Esteve, A. R. (2011). *Estudio de los aerosoles atmosféricos en Valencia mediante medidas del nefelómetro de integración*. Tesis doctoral, Universitat de València, España. Recuperado el 26 de Marzo de 2019
- François, J. (2011). *Aplicaciones del Sensor MODIS para el monitoreo del territorio. México*. Recuperado el 15 de Mayo de 2019, de http://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/aplicacionesMODIS.pdf
- Gerencia de Desarrollo Urbano y Ambiental. (2006). *Plan de Desarrollo Urbano Huancayo*. Recuperado el 15 de Marzo de 2019, de http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios_CS/Region_Juin/huancayo/huancayo_PDU.pdf
- Ghauri, B. M. (2019). Aerosol Variability as Deduced from Satellite and Ground Based Systems. Recuperado el 17 de Julio de 2019, de <http://www.suparco.gov.pk/pages/presentations-pdf/day-3/session-1/14A-II/1.pdf>

- Gomes, J. (2016). *Estudo do Aerossol (poeira do Sara) na região de Cabo Verde*. Tesis de Doctorado, Universidade de Aveiro, Brasil. Recuperado el 23 de Marzo de 2016, de <https://ria.ua.pt/>
- Hess, M., Koepke, P., & Schult, I. (1998). Optical Propierties of Aerosols and Clouds: the Software Package OPAC. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 831-835. doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0831:OPOAAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0831:OPOAAC>2.0.CO;2)
- Houthuijs, D., Breugelmans, O., Hoek, G., Vaskövi, É., Miháliková, E., S. Pastuszka, J., . . . de Leeuw, F. (2001). PM10 and PM2.5 concentrations in Central and Eastern Europe:: results from the Cesar study. *Atmospheric Environment*, 35(15), 2757-2771. doi:[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00123-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00123-6)
- Ichoku, C., Allen Chu, D., Mattoo, S., Kaufman, Y. J., A. Remer, L., Tanré, D., . . . N. Holben, B. (2002). A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products. *Geophysical Research Letters*, 29(12). doi:<https://doi.org/10.1029/2001GL013205>
- Instituto Geofísico del Perú. (2010). *Memoria del Subproyecto "Pronóstico estacional de lluvias y temperatura del aire en la cuenca del río Mantaro para su aplicación en la agricultura"*. Recuperado el 22 de Marzo de 2019, de <http://www.met.igp.gob.pe/proyectos/incagro/datos/libromemoria.pdf>
- Instituto Geofísico del Perú. (2015). *Ministerio del Ambiente*. Obtenido de <https://portal.igp.gob.pe/nasa-igp-inician-mediciones-aerosoles-atmosfericos-observatorio-huancayo>
- Instituto Geofísico del Perú. (29 de Agosto de 2019). *IGP advierte incremento de aerosoles que deterioran la calidad del aire*. Obtenido de IGP advierte incremento de aerosoles que deterioran la calidad del aire: <https://www.igp.gob.pe/version-anterior/igp-advierte-incremento-aerosoles-que-deterioran-calidad-aire>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2015). *Estado de la Población Peruana 2015*. Recuperado el 12 de Marzo de 2019, de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaes/Est/Lib1251/Libro.pdf

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007 The Physical Science Basis*. Recuperado el 3 de Marzo de 2019, de https://wg1.ipcc.ch/publications/wg1-ar4/faq/docs/AR4WG1_FAQ-Brochure_LoRes.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). *Quinto informe de evaluación del IPCC Cambio climático 2013*. Recuperado el 23 de Febrero de 2019, de http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SOD_Ch07_All_Final.pdf
- Li, B., Yuan, H., Feng, N., & Tao, S. (2009). Comparing MODIS and AERONET aerosol optical depth over China. *International Journal of Remote Sensing*, 30(24), 6519-6529. doi:10.1080/01431160903111069
- Llamas, R. M., Bonifaz, R., Valdés, M., Riveros-Rosas, D., & Leyva Contreras, A. (2013). Spatial and temporal variations of atmospheric aerosol optical thickness in northwestern Mexico. *Geofísica Internacional*, 52(4), 321–341. doi:[https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(13\)71480-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(13)71480-6)
- Llorente, A. M. (2017). *Evaluación de la variabilidad espaciotemporal de la profundidad óptica de aerosoles en la zona carbonífera del Cesar a partir de observaciones satelitales*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia. Recuperado el 2 de Diciembre de 2018, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/>
- Martínez, J. A. (2011). *Aerosoles antárticos finos troposféricos: "composición iónica y su vinculación con la extensión del hielo marino"*. Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile. Recuperado el 25 de Marzo de 2019, de <http://repositorio.uchile.cl/search-filter?field=author&rpp=20>
- Martínez, P. S., & Rodríguez de Torres, B. A. (2000). *Evaluación de la Contaminación Atmosférica Producida por Partículas en Suspensión en las Redes de Calidad del Aire de la Comunidad de Madrid*. CIEMAT. Recuperado el 9 de Septiembre de 2020, de https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/106/38106963.pdf

- Mas, P. (2017). *Caracterización de parámetros ópticos de aerosol atmosférico en un enclave de alta montaña*. Trabajo de investigación, Universitas Miguel Hernández, España. Recuperado el 12 de Marzo de 2019, de <http://dspace.umh.es/>
- Ministério da Ciência, Tecnologia e inovações. (s.f.). *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*. Recuperado el 27 de Agosto de 2020, de Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: <http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites>
- Ministerio del Ambiente. (2001). Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire. *Decreto Supremo N°74-2001-PCM*, 8. Recuperado el 25 de Noviembre de 2018, de <http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/D.S.-N%C2%BA-074-2001-PCM.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2012). *Resolución Ministerial N°339-2012-MINAM*. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de <https://elperuano.pe/NormasElperuano/2012/12/28/883059-1.html>
- Ministerio del Ambiente. (2013). *Cambio Climático en la Cuenca del Río Mantaro, Junín*. Recuperado el 21 de Marzo de 2019, de <https://www.care.org.pe/wp-content/uploads/2015/06/Cambio-clim--tico-en-la-cuenca-del-R--o-Mantaro-Baja.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Ministerio del Ambiente*. Obtenido de <http://www.minam.gob.pe/perulimpio/2015/06/26/cusco-y-huancayo-cuentan-con-grupos-tecnicos-para-la-mejora-de-calidad-de-aire/>
- Moya Álvarez, A. S., Arredondo, R. E., & Yuli Posadas, R. Á. (2017). Determinación de la presencia de partículas (PM10) en Perú producidas por quema de biomasa con ayuda de modelos numéricos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1), 99-108. doi:10.20937/RICA.2017.33.01.09
- Municipalidad Provincial de Huancayo. (2016). *Estudio técnico de áreas saturadas de los distritos del Tambo - Huancayo y Chilca - Provincia de Huancayo*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2018, de https://munihuancayo.gob.pe/documentos/2016/gerencia_subgerencia/transito_y_transportes/saturacion_vial.pdf

- Nisperuza, D. J. (2015). *Propiedades Ópticas de los Aerosoles Atmosféricos en la Región Andina Coombiana Mediante Análisis de Mediciones Remotas: LIDAR, Fotométricas y Satelitales*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Recuperado el 21 de Mayo de 2019, de <http://bdigital.unal.edu.co/48465/>
- Núñez Romero, D. M. (2017). *Caracterización de la variación diurna, mensual y estacional del espesor óptico de aerosoles, registrados en el observatorio de Huancayo, periodo marzo-2015 hasta julio-2016*. Tesis de grado, Universidad Continental, Perú-Huancayo. Recuperado el 27 de Agosto de 2020, de <https://hdl.handle.net/20.500.12394/3825>
- Obradovic, Z., Das, D., Radosavljevic, V., Ristovski, K., & Vucetic, S. (2010). Spatio-Temporal characterization of aerosols through active use of data from multiple sensors. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 38(7B), 424-429. Recuperado el 9 de Septiembre de 2020, de https://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part7/b/proceedings_partBweb.pdf
- Obregón, Á. (2012). *Estudio de los aerosoles en columna sobre Cáceres a partir de medidas radiométricas*. Tesis Doctoral, Badajoz, España. Recuperado el 13 de Diciembre de 2018, de <http://dehesa.unex.es/>
- Oraá, C. Á. (2018). *Correlación de las Propiedades atmosféricas de los aerosoles medidas en tierra y datos de satélite*. Tesis de fin de grado, Universidad de Valladolid, España. Recuperado el 12 de Marzo de 2019, de <http://biblioteca.uva.es/export/sites/biblioteca/>
- Organización Mundial de la Salud. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2018, de http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/es/
- Organización Mundial de la Salud. (2 de Mayo de 2018). *OMS*. Recuperado el 4 de Noviembre de 2018, de OMS: [http://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

- Ortiz de Galisteo Marín, J. P. (2011). *Análisis del contenido total en columna de vapor de agua atmosférico sobre la Península Ibérica medido con distintas técnicas: radiosondas, fotómetros solares y sistema GPS*. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid. Recuperado el 3 de Mayo de 2020, de <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/888>
- Otero, L., Ristori, P., Holben, B., & Quel, E. (2006). Espesor óptico de aerosoles durante el año 2002 para diez estaciones pertenecientes a la red AERONET – NASA. *Optica Pura y Aplicada*, 39(4). Recuperado el 25 de Agosto de 2020, de https://www.sedoptica.es/Menu_Volumenes/Pdfs/228.pdf
- Palacios, L. (2014). *Estudio del efecto directo de los aerosoles atmosféricos sobre Europa*. Universidad de Murcia. Recuperado el 23 de Marzo de 2019
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. (1992). *Primer Informe de Evaluación del IPCC*. Recuperado el 23 de Agosto de 2020, de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc_90_92_assessments_far_full_report_sp.pdf
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático. (2001). *Tercer Informe de Evaluación sobre el Cambio Climático*. Recuperado el 23 de Agosto de 2020, de https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/scientific_spm_ts_sp.pdf
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. (1995). *Segunda Evaluación del Cambio Climático IPCC*. Recuperado el 23 de Agosto de 2020, de <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/2nd-assessment-sp.pdf>
- Pérez, D. (2010). *Caracterización del Aerosol atmosférico en la ciudad de Granada mediante fotometría solar y estelar*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Granada, España. Recuperado el 24 de Febrero de 2019, de <http://digibug.ugr.es/>
- Pesantez, M. A. (2013). *Validación de productos MODIS nivel 3 (aerosoles) sobre la Costa Mediterránea Septentrional*. Tesis de maestría, Universitat de València, España. Recuperado el 22 de Febrero de 2019, de <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1283/1/T-SENESCYT-00495.pdf>

- Pey, J. (2007). *Caracterización Físico-Química de los aerosoles atmosféricos en el Mediterraneo Occidental*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España. Recuperado el 24 de Febrero de 2019, de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/94310>
- Piñas, P. R. (2015). Modelos e instrumentos para estudios sobre espesor óptico de aerosoles y su relación con el forzamiento radiativo terrestre. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 05(02), 205-210. doi:<http://dx.doi.org/10.18259/acs.2015030>
- Prasad, A. K., & Singh, R. P. (2007). Comparison of MIRS-MODIS aerosol optical depth over the Indo-Gangetic basin during the winter and summer seasons (2000-2005). *Remote Sensing of Environment*, 107(1-2), 109-119. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.026>
- Préndez, M. M., Ortiz, J., Zolezzi, S., Campos, C., & Apablaza, N. (1991). Aerosoles atmosféricos de naturaleza inorgánica, contaminación en Santiago de Chile. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 7, 224-237. Recuperado el 26 de Enero de 2019, de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/121469>
- Rezende, D. C. (2006). *Estudo da influência da poluição do ar e condições atmosféricas na saúde em San José dos Campos*. Recuperado el 25 de Marzo de 2019, de <http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m15@80/2006/08.09.19.29/doc/Daniela%20Cristina%20Damilano.pdf>
- Rojas, L., & Garibay, V. (2003). Las partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles: ¿hacen daño a la salud?; ¿podemos hacer algo? *Gaceta Ecológica*, 69, 29-44. Recuperado el 3 de Noviembre de 2018, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906902>
- Rojas, N. (2014). *Estudio de la dinámica del espesor óptico de los aerosoles producidos por fuentes naturales y antropogénicas a partir de las imágenes del sensor modis a bordo del satélite terra y aqua sobre América del Sur (2000-2012)*. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Recuperado el 12 de Marzo de 2019, de <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/>
- Romero Placeres, M., Álvarez Toste, M., & Álvarez Pérez, A. (2007). Los factores ambientales como determinantes del estado de salud de la población. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 45(2). Recuperado el 9 de Septiembre de 2020, de

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032007000200001&lng=es.

Salcedo, D. (2007). Aire y algo más. *Educación Química*, 18(2), 169-176. doi:<http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2007.2>

Scagliotti, A. F., & Jorge, G. A. (2020). Análisis de un año de mediciones con fotómetro solar en el noroeste del Conurbano Bonaerense. *Anales AFA*, 31(2), 46-50. doi:<https://doi.org/10.31527/analesafa.2020.31.2.46>

Seinfeld, J., & Pandis, S. (1998). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. New York, Estados Unidos. Recuperado el 9 de Febrero de 2019

Soledad, N., Palomar, J., Atilio, A., & Fernández, A. (2018). Estudio de la correlación mensual entre AOD obtenido de imágenes MODIS y material particulado para una ciudad costera. *Centro de Investogaciones del Medioambiente*. Recuperado el 9 de Junio de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/325824628_Estudio_de_la_correlacion_mensual_entre_AOD_obtenido_de_imagenes_MODIS_y_material_particulado_para_una_ciudad_costera

Souza, M. d. (2016). *Estudo da distribuição de tamanho e composição iônica de aerossóis e seus efeitos na capacidade de nuclear gotas de nuvens*. Tesis doctoral, Universidade Estadual Paulista, Araquara, Brasil. Recuperado el 21 de Febrero de 2019, de <https://repositorio.unesp.br/>

Suarez, L. (2015). Cosmonauta en la astropista. *Observatorio de Huancayo ingresa a Red Aeronet de la NASA*. Obtenido de <http://cosmonautaenlaastropista.blogspot.com/>

Suárez, L., Álvarez, D., Bendezú, Y., & Pomalaya, J. (2017). Caracterización Química del material particulado atmosférico del centro urbano de Huancayo, Perú. *Sociedad Química del Perú*, 83(2), 187-199. Recuperado el 22 de Marzo de 2019, de <http://sqperu.org.pe/revista-sqp/>

Toledano, C. (2005). *Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación "El Arenosillo" de la red AERONET*. Tesis doctoral, Universidad de Valladolid, Valladolid, España. Recuperado el 25 de Marzo de 2019, de <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/29641>

World Meteorological Organization. (2016). *WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations*. Recuperado el 9 de Septiembre de 2020, de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3073

Zhu, X., Qiu, H., Wang, L., Duan, Z., Yu, H., Deng, R., . . . Zhou, L. (2018). Risks of hospital admissions from a spectrum of causes associated with particulate matter pollution. *Science of The Total Environment*, 656, 90-100. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.240>