

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS



**VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL ESPESOR ÓPTICO DE
AEROSOLIOS UTILIZANDO IMÁGENES DEL SENSOR MODIS,
REGIÓN DE AYACUCHO, PERIODO 2003-2019.**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
LICENCIADO EN CIENCIAS FÍSICO - MATEMÁTICAS
EN LA ESPECIALIDAD DE FÍSICA**

PRESENTADO POR:

Bach. ALFREDO GAMBOA MENDOZA

ASESOR:

Mg. RENATO SOCA FLORES

Ayacucho – Perú

2022



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

“Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional”

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 021-2022-FIMGC

En la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal N° 032-2022-FIMGC-D**, siendo los veintisiete días del mes de enero del 2022, a horas 2.00 p.m.; se reunieron los jurados del acto de sustentación, en el Auditorium virtual google meet del Campus Universitario de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Siendo el Jurado de la sustentación de tesis compuesto por el Presidente el **Mg. Walter Mario SOLANO REYNOSO**, delegado por el Decano de la FIMGC, Jurado el **Lic. Marco Adolfo CASTILLO JARA**, Jurado – Asesor el **Mg. Renato SOCA FLORES** y Secretario del proceso el **Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR**, con el objetivo de recepcionar la sustentación de la tesis denominada **“VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOLES UTILIZANDO IMÁGENES DEL SENSOR MODIS, REGIÓN DE AYACUCHO, PERÍODO 2003- 2019”**, sustentado por el Señor **Alfredo GAMBOA MENDOZA**, Bachiller en **Ciencias Físico Matemáticas**

El Jurado luego de haber recepcionado la sustentación de la tesis y realizado las preguntas, el sustentante al haber dado respuesta a las preguntas, y el Jurado haber deliberado; califica con la nota aprobatoria de **18 (dieciocho)**.

En fe de lo cual, se firma la presente acta, por los miembros integrantes del proceso de sustentación.



Mg. Walter Mario SOLANO REYNOSO
Presidente

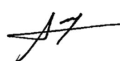


Lic. Marco Adolfo CASTILLO JARA
Jurado



Firmado digitalmente por
SOCA FLORES RENATO
Fecha: 2022.01.31
23:10:01 -05'00'

Mg. Renato SOCA FLORES
Jurado Asesor



Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR
Secretario del Proceso

Firmado
digitalmente por
LEZAMA CUELLAR
CHRISTIAN

c.c.:
Bach. Alfredo GAMBOA MENDOZA
Jurados (3)
Archivo

**UNSCH**FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL**“Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional”**

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado en segunda instancia para las **Escuelas Profesionales** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la UNSCH y Resolución Decanal N° 158-2021-FIMGC-UNSCH-D, deja constancia que Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : GAMBOA MENDOZA, Alfredo

Escuela Profesional : CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

Título de la Tesis : VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOL UTILIZANDO IMÁGENES DEL SENSOR MODIS, REGIÓN DE AYACUCHO, PERIODO 2003-2019

Evaluación de la Originalidad : 19 % Índice de Similitud

Identificador de la entrega : 1748353829

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

Ayacucho, 25 de enero del 2022

Firmado
digitalmente por
**LEZAMA CUELLAR
CHRISTIAN**

Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
de la FIMGC

Numero de constancia: **016-2022-FIMGC.**

(X) Con depósito para Sustentación y Tramite de Título

DEDICATORIA

*A mi madre y mis hermanos, por la fortaleza, a pesar de las
circunstancias, y a todos mis amigos de FISMA, que es lo mejor
que tengo en la vida.*

AGRADECIMIENTOS

Al Mg. Renato Soca Flores, asesor del presente trabajo por su apoyo y motivación en el desarrollo del presente trabajo.

Al Mg. Walter Mario Solano Reynoso, por sus observaciones en el transcurso del desarrollo del presente trabajo.

Al Lic. Marco Adolfo CASTILLO JARA, por sus observaciones en la redacción y ortografía del presente trabajo

A los integrantes del Laboratorio de Teledetección (LABTELER) de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH) por el apoyo durante el desarrollo del presente trabajo.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de tesis es estudiar la variabilidad espacial y temporal del espesor óptico de aerosoles (AOD) en la región de Ayacucho, a partir de imágenes productos MOD04_3k y MYD04_3k de resolución espacial de 3 km, provenientes del sensor MODIS que se encuentra a bordo de los satélites Terra y Aqua. El área de estudio corresponde a toda la región de Ayacucho, ubicada entre las coordenadas de latitudes (-11.9,-15.75) y longitudes (-72.5, -75.5); el periodo de estudio es de 17 años del 2003 al 2019. Las imágenes productos de AOD diarios fueron tratados en dos partes, primero georreferenciados en la plataforma LAADS DAAC, luego se utilizó el lenguaje de programación IDL y el software ENVI 5.3 para generar los promedios mensuales, también se utilizó el software ArcGIS para los mapas temáticos.

Entre los resultados se obtuvieron: la distribución espacial total de AOD, del promedio de 17 años de los datos AOD/Aqua y AOD/Terra sobre la región de Ayacucho, se observa que las concentraciones mayores de AOD se encuentran en la zona noreste (NE) llegando a valores máximos de 0.288, y en la ciudad de Ayacucho llegando a un valor máximo de 0.419, mientras valores bajos en las demás áreas. Por otro lado, la variabilidad temporal mensual de AOD de los 17 años; para la región de Ayacucho, provincia de Huamanga y la ciudad de Ayacucho sus series de tiempo tienen un comportamiento cíclico tanto para los datos AOD/Aqua y AOD/Terra; con respecto a los valores mínimos del AOD/Terra en la serie de tiempo se aprecia que están asociadas a los valores mínimos de AOD/Aqua, pero no en los máximos. La variabilidad espacial del ciclo anual de AOD para los 12 meses, región de Ayacucho, muestra que las áreas de alto valor de AOD se encuentran en el noreste (NE) en los meses de agosto, setiembre y octubre, mientras los valores bajos se encuentran en la zona centro y sur del área de estudio; con respecto a la variación temporal del ciclo anual de AOD para los 12 meses, región de Ayacucho, provincia de Huamanga

y la ciudad de Ayacucho, muestran un comportamiento similar, decreciendo a partir del mes de febrero hasta un mínimo en junio a partir de aquí tiene un comportamiento creciente en los meses siguientes hasta diciembre, de esta manera este ciclo se repite en cada año de estudio. La variabilidad espacial interanual de AOD, región de Ayacucho, muestra en general valores uniformes excluyendo las concentraciones anómalas en la parte noroeste (NE), causada posiblemente por precipitaciones o quema selectiva. En el caso de la variabilidad temporal interanual de AOD, en la región de Ayacucho, Provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho, se observa que hay una ligera tendencia de crecimiento en los 17 años, para MODIS Aqua.

Palabras clave: Variabilidad, AOD, Aerosoles, MODIS, MOD04_3k y MYD04_3k.

ABSTRACT

This thesis work's objective is to study the special and temporary variability of Aerosol Optical Depth (AOD) in Ayacucho region, starting from MOD04_3k and MYD04_3k image products at 3-km spatial resolution, gotten by MODIS sensor which is aboard Terra and Aqua satellites. The study area corresponds to all Ayacucho region, which is in latitude range from -11.9 to -15.75 and longitude range from -72.5 to -75.5; study period is 17 years, from 2003 to 2019. The image products from daily AOD were analyzed in two parts, first were georeferenced in LAADS DAAC platform, followed by using IDL programming language and ENVI 5.3 software to generate monthly means; for thematic maps, ArcGIS software also was used.

Among the results were obtained: the Spatial distribution of total AOD, from the mean of 17-year AOD/Aqua and AOD/Terra data over the Ayacucho region, it is observed that the highest concentrations of AOD are found in the northeast area (NE) reaching maximum values of 0.288, and in Ayacucho city, reaching a maximum value of 0.419, whereas low values in the other areas. On the other hand, the monthly temporal variability of 17-year ODA for Ayacucho region, Huamanga province and the city of Ayacucho, their time series have a cyclical behavior for both the AOD/Aqua and AOD/Terra data; regarding the minimum values of AOD/Terra in the time series, they are associated with the minimum values of AOD/Aqua, but not with the maximum. The spatial variability of yearly cycle AOD for 12 months, Ayacucho region, shows that AOD high value areas are found in the northeast (NE) from August to October, whereas the low value areas are in central and south zone; about the temporal variability of yearly cycle AOD for 12 months, Ayacucho region, Huamanga province, and Ayacucho city, shows a similar behavior, decreasing from February until June with the lowest value, followed by an escalating behavior the rest of the months until December, in the same way this cycle repeats each

year of study. AOD interannual spatial variability, Ayacucho region, shows generally uniform values excluding the anomalous concentration in the northwest (NW), possibly caused by precipitation or selective burning. Regarding AOD interannual temporal variability, in Ayacucho region, Huamanga province, and Ayacucho city, there is a soft tendency to increase during the 17 years in MODIS Aqua.

Keywords: Variability, AOD, aerosols, MODIS, MOD04_3k and MYD04_3k.

ACRÓNIMOS

AIRS	Atmospheric Infrared Sounder
AERONET	Aerosol Robotic Network
AMSU-A	Advanced Microwave Sounding Unit
AOD	Aerosol Optical Depth
AOT	Aerosol Optical Thickness
ASTER	Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CERES	Clouds and Earth's Radiant Energy System
ENVI	Environment for Visualizing Images
EOS	Earth Observing System
GIS	Geographical Information System
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GPS	Global Positioning System
HDF	Hierarchical Data Format
IDL	Interactive Data Language
LAADS	Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System
MISR	Multi-angle Imaging Spectroradiometer
MOD	MODIS Terra product
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MOPIT	Measurement of Pollution in the Troposphere
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ND	Números Digitales
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
REM	Radiación eletromagnética
TOA	Top of Atmosphere

ÍNDICE

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ACRÓNIMOS	VII
ÍNDICE	VIII
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABLAS	XVI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Aerosoles.....	1
1.2 Antecedentes	2
1.2 Descripción de la situación problemática	3
1.3 Formulación del problema	3
1.3.1 Problema general.....	3
1.3.2 Problemas específicos	4
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo general.....	4
1.4.2 Objetivos específicos	4
1.5 Justificación e importancia de la investigación.....	4
1.6 Hipótesis.....	5
1.6.1 Hipótesis general.....	5
1.6.2 Hipótesis específicas	5
1.7 Organización de la tesis	5
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO	7
2.1 Los aerosoles atmosféricos	7
2.1.1 Procesos de formación	7

2.1.2	Tiempos de vida media de las partículas en la atmósfera	8
2.1.3	Efecto de los aerosoles sobre el clima	9
2.2	Radiación en la atmósfera	10
2.2.1	Balance energético de la tierra	10
2.2.2	Interacción de la radiación solar con la atmósfera	11
2.2.3	Dispersión de Rayleigh	12
2.2.4	Dispersión de Mie	13
2.2.5	Absorción atmosférica	14
2.2.6	Ecuación de transferencia radiativa	16
2.2.7	Ley de Lambert-Beer-Bouger	17
2.3	Teledetección	18
2.3.1	Ventajas y aplicaciones	19
2.3.2	Resolución de imágenes de satélite	20
2.4	Satélites artificiales y sensores	22
2.4.1	Satélite Terra	22
2.4.2	Satélite Aqua	23
2.4.3	Sensor MODIS	24
2.4.4	Especificaciones del sensor MODIS	25
2.4.5	Componentes del sensor MODIS	28
2.4.6	Las colecciones	30
2.4.7	Identificación de productos	30
2.4.8	Creación de imagen digital	31
2.5	Espesor óptico de los aerosoles	32
2.5.1	¿Qué es el espesor óptico de los aerosoles?	32
2.5.2	Cálculo de AOT a partir de datos satelitales	32
2.5.3	Algoritmo utilizado para obtener el espesor óptico de los aerosoles a partir de MODIS	35

CAPÍTULO 3. ÁREA DE ESTUDIO	38
3.1 Ubicación del área de estudio	38
3.2 Geografía.....	39
3.3 Clima	39
CAPÍTULO 4. DATOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADOS	40
4.1 Datos imágenes diarios de AOD del sensor MODIS-Terra y Aqua	40
4.2 Calidad de los datos imágenes de AOD MODIS- Terra y Aqua	40
4.3 Programas utilizados.	41
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA.....	42
5.1 Adquisición de imágenes MOD04_3k y MYD04_3k	42
5.2 Procesamiento de los datos	43
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUCIONES	50
6.1 Distribución espacial y temporal de AOD en la región de Ayacucho	50
6.1.1 Distribución espacial total de AOD	50
6.1.2 Variabilidad temporal total de AOD	53
6.1.3 Variabilidad anual de AOD.....	54
6.1.3.1 Variabilidad espacial del ciclo anual de AOD.....	54
6.1.3.2 Variación temporal del ciclo anual de AOD	58
6.1.4 Variabilidad estacionalidad de AOD	60
6.1.4.1 Variabilidad espacial de la estacionalidad de AOD.....	60
6.1.4.2 Variabilidad temporal de la estacionalidad de AOD	64
6.1.5 Variabilidad interanual de AOD	68
6.1.5.1 Variabilidad espacial interanual de AOD	68
6.1.5.2 Variabilidad temporal interanual de AOD.....	71
6.2 Correlación entre los datos de AOD satelital (MODIS) e in situ (AERONET).....	74
6.3 Discusión.....	76

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
7.1 Conclusiones	77
7.2 Recomendaciones.....	78
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	79
ANEXOS	84
1. Conceptos básicos	84
1.1 Naturaleza de la radiación.....	84
1.2 Espectro electromagnético	85
1.3 Espectro visible	85
1.4 Magnitudes radiométricas básicas	86
2. Algoritmos en lenguaje de programación IDL	88
3. Resultados adicionales	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Reducción de la intensidad radiante al atravesar un medio de extinción.	16
Figura 2.2.	Satélite artificial Terra	23
Figura 2.3.	Satélite artificial Aqua	24
Figura 2.4.	Angulo de visión del sensor MODIS.	26
Figura 2.5.	Proceso de digitalización de una imagen a partir de una escena	32
Figura 2.6.	Contribución de la reflectancia bidireccional del sistema atmósfera-superficie.....	34
Figura 3.1.	Mapa de ubicación	38
Figura 5.1.	Información del producto MODIS Aqua	43
Figura 5.2.	Imagen de MYD04_3K del día jueves, 18 de mayo del 2017.	45
Figura 5.3.	Especificaciones del procesamiento de imágenes MODIS Aqua	45
Figura 5.4.	Esquema de la metodología desarrollada.	49
Figura 6.1.	Se muestra la variación espacial del promedio de AOD en la región de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite Aqua en el periodo de 2003-2019.....	51
Figura 6.2.	Se muestra la variación espacial del promedio de AOD en la región de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite Terra en el periodo de 2003-2019.....	52
Figura 6.3.	Se muestra la variación del promedio mensual AOD de la a) región de Ayacucho, b) provincia Huamanga y c) ciudad de Ayacucho observada por MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua en el periodo 2003-2019.	54
Figura 6.4.	Ciclo anual de AOD MODIS/Aqua para la región de Ayacucho en el periodo 2003-2019.	57
Figura 6.5.	Ciclo anual de AOD MODIS/Terra para la región de Ayacucho en el periodo 2003-2019.	58
Figura 6.6.	Se muestra la variación AOD de los promedios por meses de 17 años de la a) región Ayacucho, b) provincia Huamanga y c) ciudad de Ayacucho	

	observada por MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua en el periodo 2003-2019.	59
Figura 6.7.	Distribuciones espaciales estacionales de AOD promediadas durante 17 años (2003-2019) extraídas de MODIS/Aqua en la región de Ayacucho. Los espacios en blanco en la figura son áreas para las que no hay datos disponibles.	62
Figura 6.8.	Distribuciones espaciales estacionales de AOD promediadas durante 17 años (2003-2019) extraídas de MODIS/Terra en la región de Ayacucho. Los espacios en blanco en la figura son áreas para las que no hay datos disponibles	63
Figura 6.9.	Series de tiempo estacional de AOD (Aqua/Terra) promediadas para el período 2003-2019 para la región de ayacucho, junto con las pendientes y el coeficiente de correlación (r) de la tendencia lineal.	65
Figura 6.10.	Series de tiempo estacional de AOD (Aqua/Terra) promediadas para el período 2003-2019 para la provincia de Huamanga, junto con las pendientes y el coeficiente de correlación (r) de la tendencia lineal.	66
Figura 6.11.	Series de tiempo estacional de AOD (Aqua/Terra) promediadas para el período 2003-2019 para la ciudad de Ayacucho, junto con las pendientes y el coeficiente de correlación (r) de la tendencia lineal.	66
Figura 6.12.	Distribuciones espaciales anuales de AOD en la región de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite Aqua, periodo 2003-2019...	69
figura 6.13.	Distribuciones espaciales anuales de AOD en la región de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite Terra, periodo 2003-2019...	70
Figura 6.14.	Las variaciones interanuales de la media anual de AOD, de la región de Ayacucho, provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho observada por MODIS a bordo de los satélites Aqua y Terra, periodo 2003-2019.	73
Figura 6.15.	Diagrama de dispersión entre la colección observada por MODIS a bordo del satélite Aqua, periodo 2003-2019, con las correspondientes recuperaciones de AERONET. (La línea roja es la línea de regresión y las líneas negras definen la envolvente de EE).	74

Figura 6.16. Diagrama de dispersión entre la colección observada por MODIS a bordo del satélite Terra, periodo 2003-2019, con las correspondientes recuperaciones de AERONET. (La línea roja es la línea de regresión y las líneas negras definen la envolvente de EE).	75
Figura A.1.1. Espectro visible	85
Figura A.1.2. Definición del ángulo sólido, donde ρ representa el área y r la distancia	86
Figura A.3.1. Se muestra la comparación de las variaciones de los promedios mensuales AOD, de la región de Ayacucho y Ciudad de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite Aqua, periodo 2003-2019.....	94
Figura A.3.2. Se muestra la comparación de las variaciones de los promedios mensuales AOD, de la región de Ayacucho y ciudad de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite Terra, periodo 2003-2019.....	94
Figura A.3.3. Se muestra la comparación de las variaciones de los promedios mensuales AOD, de la provincia Huamanga y ciudad de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite Terra, periodo 2003-2019.....	95
Figura A.3.4. Muestra la comparación de las variaciones de los promedios mensuales AOD, de la provincia Huamanga y ciudad de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite Aqua, periodo 2003-2019.....	95
Figura A.3.5. Se muestra la comparación de las variaciones AOD de los promedios por meses de 17 años, en la región de Ayacucho, provincia Huamanga y ciudad de Ayacucho observada por MODIS a bordo del satélite Terra, periodo 2003-2019	96
Figura A.3.6. Muestra la comparación de las variaciones AOD de los promedios por meses de 17 años, de la región de Ayacucho, provincia Huamanga y ciudad de Ayacucho observada por MODIS a bordo del satélite Aqua, periodo 2003-2019.....	96
Figura A.3.7. Muestra la comparación de las variaciones de los promedios anuales AOD, de la región de Ayacucho, provincia Huamanga y ciudad de Ayacucho observada por MODIS a bordo del satélite Terra, periodo 2003-2019...	97

Figura A.3.8. Se muestra la comparación de las variaciones de los promedios anuales AOD, de la región de Ayacucho, provincia Huamanga y ciudad de Ayacucho observada por MODIS a bordo del satélite Aqua, periodo 2003-2019.....	97
--	----

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Tiempos de vida media para partículas de aerosol desértico, según rangos de tamaño	9
Tabla 2.2	Características de las bandas espectrales del sensor MODIS	27
Tabla 5.1	Total de imágenes MOD04_3k y MYD04_3k por año	46
Tabla 6.1	Valores medios de AOD en la región de Ayacucho, provincia Huamanga y ciudad de Ayacucho observada por MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua en el periodo 2003-2019.....	53
Tabla 6.2.	Promedio mensual y desviación estándar de AOD/A: Aqua y AOD/T: Terra en la región de Ayacucho, provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho para el período 2003-2019.....	56
Tabla 6.5	Promedio anual y desviación estándar de AOD/Aqua de la región de Ayacucho, provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho para el período 2003-2019.....	72
Tabla 6.6	Promedio anual y desviación estándar de AOD/Terra de la región de Ayacucho, provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho para el período 2003-2019.....	72
Tabla 6.7	Promedio anual y desviación estándar de AOD (Aqua/Terra) junto con las pendientes, el coeficiente de correlación (r) de la tendencia lineal en las áreas de estudio, promediadas para el período 2003-2019 (nivel de confianza 95%)	73
Tabla A.3.1	Datos AOD a partir de MOD04_3k y MYD04_3k.....	98
Tabla A.3.2	Valores de AOD, Aqua y de AERONET usados en la validación (I). .	103
Tabla A.3.3	Valores de AOD, Aqua y de AERONET usados en la validación (II). .	104
Tabla A.3.4	Valores de AOD, Terra y de AERONET usados en la validación (I). .	105
Tabla A.3.5	Valores de AOD, Terra y de AERONET usados en la validación (II) .	106
Tabla A.3.6	Valores de AOD, Terra y de AERONET usados en la validación (III)	107

INTRODUCCIÓN

1.1 Aerosoles

Los aerosoles son partículas sólidas o líquidas suspendidas en la atmósfera (Lenoble et al., 2013), con tamaños que oscilan desde los nanómetros hasta decenas de micras, siendo su origen natural o antropogénico. Los aerosoles de origen natural son por ejemplo la sal del rocío marino, el polvo de los desiertos, las partículas volcánicas; mientras que las antropogénicas resultan de la contaminación industrial, emisiones de los vehículos, incendios provocados, erosión del suelo por actividad agrícola y la minería abierta. (Kondratyev et al., 2005). La mayoría de estas partículas provienen de la superficie terrestre es decir de origen natural, por lo que generalmente se concentran en las capas bajas de la troposfera, pero hay otras partículas que pueden alcanzar niveles más altos de la troposfera entre 4 a 6 km y pueden ser transportados a largas distancias. A nivel estratosfera los aerosoles son abundantes después de grandes erupciones volcánicas, aunque mucho menos numeroso que los aerosoles de la troposfera (Lenoble et al., 2013). De igual manera en la concentración de aerosol, sobre los océanos y sobre tierra existe un desequilibrio, es decir que la concentración decrece hacia océano ya que la tierra muestra mayor eficiencia de producción de partículas que los mares. A partir de un criterio de reparto latitudinal se considera que alrededor del 61% de las partículas que se hallan en la atmósfera tienen su origen en el hemisferio Norte. Debido primordialmente a que este muestra mayor expansión de tierras que el hemisferio Sur. La mayor parte de las partículas elaboradas en el hemisferio Norte lo son en el cinturón entre los 30° y 60°, donde se encuentra el 88% de todas las fuentes de partículas de origen antropogénico. Estudios realizados prueban la existencia de un fondo casi continuo de aerosoles, con una

concentración de unos cientos de partículas por centímetro cúbico, en alturas por encima de los 5 km sobre tierra y de unos 3 km sobre océanos. En cuanto a su composición los aerosoles presentan alta variación, Puede incluir carbón orgánico, carbón elemental, sulfatos, nitratos, minerales provenientes del suelo y sal. Cada partícula puede contener uno o más de estos compuestos (Díaz, 1999).

1.2 Antecedentes

Della (2018), en la ciudad de Córdoba (Argentina) y sus alrededores investigó la variabilidad espacial y temporal de los aerosoles, utilizando imágenes satelitales de espesor óptico de los aerosoles, de resolución temporal diaria por un periodo de 10 años que comprende del 2003 al 2013, con el algoritmo llamado implementación de corrección atmosférica multi- ángulo (MAIAC)

Shen et al. (2020), Investigaron las variaciones interanuales de AOD tanto espacial y temporal en la cuenca de Twain-Hu (THB) que cubre las provincias de Hubei y Hunan en el centro de China; como resultado encontraron una tendencia creciente en las series de tiempo de la variación interanual de AOD para THB y su entorno en los últimos 19 años, se utilizó datos del sensor MODIS de 2000 a 2018.

Rodríguez (2016), evaluó la distribución temporal y espacial de los promedios mensuales de monóxido de carbono (CO) y el espesor óptico de los aerosoles, que están relacionados con la quema de biomasa en los bosques. Los datos utilizados fueron del sensor MODIS del satélite Terra y el sensor AIRS del satélite Aqua con una resolución espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. La investigación se realizó en las provincias de Loreto, Piura, Ucayali, Madre de Dios, Tacna y Lima.

Ouriques (2012), en Brasil, realizó una comparación del espesor óptico de aerosoles de la región São Martinho (región rural) con la región de São Paulo (región industrial). Los

datos utilizados para la región São Martinho fueron del sensor MODIS (satélite Terra y Aqua), fotometro solar de AERONET y un espectrofotometro Brewer, mientras para la región de São Paulo se utilizó datos de AERONET. De la comparación de las series temporales se observó que la región São Paulo registra valores muy altos del espesor óptico de aerosoles que la región São Martinho.

Vargas (2009), realizó estudios en Perú sobre la variación espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles, sobre las regiones geográficas 0° - 20° S, 90° - 70° W que pertenece a la zona del Perú y 3° - 8° S, 82° - 79° W que abarca la costa norte del Perú. Utilizó datos de imágenes del sensor MODIS que se encuentra a bordo de los satélites Aqua y Terra, del sensor SeaWiFS que se encuentra en el satélite SeaStar, del sensor MISR a bordo del satélite Terra y del sensor MERIS a bordo del satélite ENVISAT. Se realizaron cálculos de correlaciones, se graficó el coeficiente de Angström versus el espesor óptico del aerosol, para poder clasificar los tipos de aerosoles presentes en la atmósfera de las regiones en estudio.

1.2 Descripción de la situación problemática

Los seres humanos respiramos el aire de la atmósfera que nos rodea, en esta atmósfera se encuentran suspendidas partículas llamadas aerosoles que pueden ingresar al organismo y afectar a la salud humana (Represa, s/f), por esta razón es necesario determinar la variabilidad espacial y temporal del espesor óptico de aerosoles en la región de Ayacucho.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema general

¿Cómo es la variabilidad espacial y temporal del espesor óptico de aerosoles utilizando imágenes del sensor MODIS, región de Ayacucho, periodo 2003 - 2019?

1.3.2 Problemas específicos

- a) ¿Cómo es la variabilidad espacial del espesor óptico de aerosoles utilizando imágenes MOD04_3k y MYD04_3k, región de Ayacucho, periodo 2003 - 2019?
- b) ¿Cómo es la variabilidad temporal del espesor óptico de aerosoles utilizando imágenes MOD04_3k y MYD04_3k, región de Ayacucho, periodo 2003 - 2019?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la variabilidad espacial y temporal del espesor óptico de aerosoles utilizando imágenes del sensor MODIS, región de Ayacucho, periodo 2003 – 2019.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Determinar la variabilidad espacial del espesor óptico de aerosoles utilizando imágenes MOD04_3k y MYD04_3k, región de Ayacucho, periodo 2003 -2019.
- b) Determinar la variabilidad temporal del espesor óptico de aerosoles utilizando imágenes MOD04_3k y MYD04_3k, región de Ayacucho, periodo 2003 -2019.

1.5 Justificación e importancia de la investigación

Los aerosoles son perjudiciales en la salud humana y también influyen en el clima por ello es necesario conocer el estado en que se encuentran los aerosoles.

No habiendo instrumentos de medida en la región de Ayacucho se utiliza la técnica de teledetección para evaluar la variabilidad espacial y temporal a través del parámetro espesor óptico de aerosoles, además los resultados obtenidos del espesor óptico de aerosoles para un periodo de 17 años 2003-2019 servirá para posteriores análisis por

profesionales del sector salud, agricultura y medio ambiente que quieran ver la relación de aerosoles y su problema de estudio, también el trabajo contribuirá al inicio de especialistas de la UNSCH en tratamiento de imágenes satelitales que resuelvan temas relacionados con el cambio climático de la región para el beneficio de la comunidad Ayacuchana.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

Se evalúa la variabilidad espacial y temporal del espesor óptico de aerosoles utilizando imágenes del sensor MODIS, región de Ayacucho, periodo 2003 – 2019.

1.6.2 Hipótesis específicas

- a) Se determina la variabilidad espacial del espesor óptico de aerosoles utilizando imágenes MOD04_3k y MYD04_3k, región de Ayacucho, periodo 2003 -2019.
- b) Se determina la variabilidad temporal del espesor óptico de aerosoles utilizando imágenes MOD04_3k y MYD04_3k, región de Ayacucho, periodo 2003 -2019.

1.7 Organización de la tesis

La presente investigación está organizada de la siguiente manera: En el capítulo 1, se muestra la introducción de la investigación, los antecedentes, la descripción del problema, la justificación e importancia de la investigación para identificar el problema y plantearse una hipótesis con esto definir los objetivos de la tesis. En el capítulo 2, Se describe el fundamento teórico de la tesis especificando en los aerosoles atmosféricos, radiación en la atmósfera, los satélites Terra y Aqua y el espesor óptico de aerosoles. En el capítulo 3, Se delimita el área de estudio en la cual se menciona su ubicación geográfica y el clima.

En el capítulo 4, se describe los datos y herramientas utilizados especificando en datos imágenes diarios de AOD del sensor MODIS Terra y Aqua, calidad de datos imágenes de AOD MODIS Terra y Aqua, y los programas utilizados en la investigación. En el capítulo 5, se presenta la metodología de la investigación, en la cual se describe: la adquisición de imágenes MOD04_3k y MYD04_3k y la secuencia del procesamiento de estas imágenes. En el capítulo 6, se muestra los resultados y discusiones. En el capítulo 7, se presenta las conclusiones y recomendaciones para las futuras investigaciones.

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Los aerosoles atmosféricos

2.1.1 Procesos de formación

Las reacciones fotoquímicas y químicas en la atmósfera son responsables de la formación de aerosoles, tales partículas se les denomina aerosoles secundarios, las sustancias que participan en la formación de aerosoles atmosféricos son, por ejemplo: dióxido de azufre, hidrocarburos, sulfuro de carbonilo, sulfuro de dimetilo, de amonio, óxido de nitrógeno, y algunos otros gases con oxidantes de tipo ozono, así como con partículas de vapor de agua.

Las fuentes de dióxido de azufre aparte de erupciones volcánicas son por emisiones de empresas industriales, así como de bacterias anaerobias. En cambio, fuentes de hidrocarburos son principalmente vegetación y los productos de descomposición de organismos en el suelo y agua. De todos estos gases solo una parte ($\sim 10 \pm 25\%$) forma partículas de aerosol. A continuación, se describirá tres mecanismos de formación de partículas de aerosol en la atmósfera, a partir de los gases mencionados anteriormente.

1) oxidación fotoquímica, reacciones heterogéneas.

Este proceso se lleva a cabo en las partes de la alta troposfera. La tasa de conversión constituye el 0.03% de SO_2 por oxidación fotoquímica durante una hora en aire puro. La formación de partículas de aerosol con la irradiación solar se realiza en presencia de NO_2 . Las estimaciones de las pérdidas de NO_x se determina por hidrólisis heterogénea del N_2O_5 , la eficiencia de este proceso depende del estado de fase del aerosol.

2) La oxidación catalítica en presencia de metales pesados.

La velocidad de reacción depende fuertemente de la presencia de catalizadores (iones de metales pesados) y puede ser lo suficientemente alta en aire muy contaminado. La reacción tiene lugar tanto en el aire seco y en gotas de las nubes.

3) la reacción de amonio con dióxido de azufre en presencia de agua (gotitas de nube).

La tasa de formación de partículas de sulfato en la reacción con la participación de SO_2 y NH_3 depende de la contribución de NH_3 . Si el valor de PH se mantiene suficientemente alta, por ejemplo, debido a la contribución de NH_3 , entonces la reacción continúa.

Mediciones de partículas $(NH_4)_2SO_4$ muestran que las concentraciones máximas de partículas de sulfato se observan a menudo por debajo del límite inferior de nubes. Partículas de sulfato de amonio pueden permanecer suspendidas en el aire después de la evaporación de gotas de nube y la niebla. Los núcleos iniciales de sulfato de amonio tienen radios del orden de $3 \times 10^{-9} cm$ y son transformados en gotitas de tamaño $10^{-6} cm$ aparte de ácidos sulfúrico y nítrico y sus sales. (Kondratyev et al., 2006).

2.1.2 Tiempos de vida media de las partículas en la atmósfera

Determinar el tiempo de vida media para las partículas en la atmósfera resulta ser complicado, que para los gases. Esta dificultad radica principalmente porque las partículas, generalmente las más pequeñas son inestables, es decir, cambian continuamente en composición química y tamaño. Para algunas sustancias como silicatos o partículas formadas a partir de la sal marina es posible determinar su residencia en la atmósfera.

La relación de tiempo de vida media de las partículas y altura se tiene que, el tiempo de vida de las partículas aumenta con la altura. Variando de minutos a semanas en la troposfera y llegan hasta años si tales partículas alcanzan la estratosfera (común tras las

erupciones volcánicas, por ejemplo), es lógico que partículas en la estratosfera permanezcan por más tiempo, ya que ahí procesos de eliminación tales como condensación o precipitación no se producen. En el caso de aerosoles desérticos se sitúa entre 1 hora y varios cientos de días, dependiendo de los procesos de limpieza (Díaz, 1999).

Tabla 2.1

Tiempos de vida media para partículas de aerosol desértico, según rangos de tamaño

Rango de radios (μm)	deposición húmeda (días)	Deposición seca
$0,01 < r < 1$	14	275 días
$1 < r < 10$	14	62 horas
$10 < r < 25$	14	4 horas
$r > 25$	14	1 hora

Fuente: (Díaz, 1999).

En la Tabla 2.1 se presentan los tiempos de vida media para varios rangos de tamaño de partículas. La deposición húmeda se refiere al mecanismo de interacción de las partículas con las gotas de lluvia o nubes.

2.1.3 Efecto de los aerosoles sobre el clima

Los aerosoles al estar presentes en la atmósfera influyen en el balance energético del sistema tierra atmósfera, por lo tanto, afectan al clima. Principalmente los aerosoles antropogénicos influyen en el cambio climático pues reflejan la luz solar y por esta causa se produce un enfriamiento de la superficie, los aerosoles también pueden absorber radiación solar y esto ocasiona un calentamiento de la atmósfera, pero el efecto neto de los aerosoles es para enfriar el sistema climático.

Los aerosoles atenúan la radiación solar, absorbiendo o dispersando (efecto directo de los aerosoles) (Rosário, 2011). También pueden modificar las propiedades de las nubes (efecto indirecto).

Una alta concentración de aerosoles comparte el agua condensada produciendo gotas con una reducción de tamaño en un 20-30%, esto aumenta el albedo de las nubes reflejando en mayor cantidad la radiación solar y enfriando la superficie terrestre. Las gotas de nube al no alcanzar un tamaño suficiente se mantienen por mucho más tiempo en la atmósfera y esto altera el ciclo hidrológico (Kaufman et al., 2002).

En general mientras los gases de efecto invernadero provocan calentamiento global, los aerosoles provocan un enfriamiento, pero en magnitud menor, de tal forma, el saldo resulta un calentamiento del sistema climático.

2.2 Radiación en la atmósfera

2.2.1 Balance energético de la tierra

La atmósfera es clave en el mantenimiento del equilibrio entre la recepción de la radiación solar y la emisión de la radiación infrarroja. La atmósfera regresa al espacio la misma energía que obtiene del sol. Esta acción de equilibrio se denomina balance energético de la tierra y posibilita conservar una temperatura óptima para la vida.

En promedios largos de tiempo la superficie de la tierra cede a la atmósfera una proporción de energía igual a la que absorbe. En estas condiciones de equilibrio termodinámico y en la presente situación climática se ha visto, primordialmente por medio de procedimientos de teledetección, que la temperatura promedio de la superficie de la tierra se encuentra en unos 13°C. Si la radiación solar entrante fuese más grande que la radiación saliente se generaría un calentamiento y lo opuesto generaría un enfriamiento. Por consiguiente, en equilibrio la proporción de radiación solar entrante en la atmósfera debería ser igual a la radiación solar reflejada saliente más la radiación infrarroja térmica saliente. Toda variación de este balance de radiación, así sea por razones naturales u originadas por el ser humano (antropogénico) produce un cambio de clima y del tiempo asociado.

2.2.2 Interacción de la radiación solar con la atmósfera

“La radiación solar que incide sobre las partículas atmosféricas, puede ser absorbida, transmitida o reflejada en todas las direcciones. Este fenómeno de reflexión y dispersión permite considerar a la partícula como si fuera una fuente puntual de energía” (Liou, 2002). En general las partículas tienen diferente forma y tamaño, estudiarlo como tal se hace muy complicado; por lo tanto, de aquí en adelante se considerará que las partículas tienen forma esférica, esta aproximación no es descabellada porque, partículas por ejemplo provenientes de motores de combustión interna muestran una forma esférica.

En la atmósfera, las partículas responsables de los procesos de dispersión se encuentran en el rango de moléculas ($\sim 10^{-4}\mu m$), aerosoles ($\sim 1\mu m$), gotitas de agua ($\sim 10\mu m$), cristales de hielo ($\sim 100\mu m$), gotitas de lluvia y partículas de granizo ($\sim 1cm$) (Liou, 2002).

La definición del *parámetro de tamaño* es importante, para el entendimiento del fenómeno de dispersión. Para partículas esféricas la ecuación del parámetro de tamaño está dada por:

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (2.1)$$

Donde, r es el radio de la partícula y λ es la longitud de onda de la luz incidente. Según el parámetro de tamaño se divide el estudio de dispersión de la siguiente manera.

Si $x \ll 1$, se llama dispersión de Rayleigh, un ejemplo de este caso es, la dispersión de la luz visible por moléculas atmosféricas la cual explica el color azul del cielo.

Si $x \gtrsim 1$, es decir que el tamaño de las partículas son comparables o mayor con respecto a la longitud de una onda incidente, en este caso se conoce como dispersión de Mie (Liou, 2002).

Si $x \gg 1$, la dispersión puede ser estudiada bajo la aproximación de la óptica geométrica (Liou, 2002).

2.2.3 Dispersión de Rayleigh

Según el parámetro de tamaño la aproximación de Rayleigh es para $x \ll 1$, esto significa que el tamaño de la partícula es mucho menor con respecto a la longitud de onda de la radiación incidente. “Generalmente este tipo de dispersión afecta a las longitudes de onda más cortas y es la más conocida y la de mayor influencia en teledetección, causante, por ejemplo, del color azul del cielo” (Chuvieco, 1995).

La teoría de Rayleigh se utiliza en el estudio de la dispersión molecular. Asume que el campo eléctrico E de la onda electromagnética incidente induce en la molécula un momento dipolar P que oscila a la misma frecuencia que la onda (Sobrinó, 2000).

Para el caso de que la luz incidente no está polarizada, como la luz solar, la intensidad de dispersión $I(\theta)$ según (Liou, 2002) está dado por:

$$I(\theta) = I_o \frac{\sigma_s P(\theta)}{r^2 4\pi}, \quad (2.2)$$

$$P(\cos(\theta)) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2(\theta)),$$

$$\sigma_s = \frac{\alpha^2 128\pi^5}{4\lambda^4},$$

$$\alpha = \frac{3}{4\pi N_s} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right),$$

Donde:

I_o , es la intensidad de radiación incidente.

$P(\theta)$, es la función de fase.

σ_s , es la sección eficaz de dispersión.

α , es la polarizabilidad.

N_s , es el número total de moléculas por unidad de volumen.

m , es el índice de refracción complejo.

2.2.4 Dispersión de Mie

La dispersión de Mie se realiza aproximadamente para el parámetro de tamaño que comprende desde 1 a 50, para mayores que 50 la dispersión puede ser estudiada mediante técnicas de la óptica geométrica. La teoría de Mie consiste básicamente en resolver las ecuaciones de Maxwell aproximando a las partículas como esferas y por lo tanto se utiliza coordenadas esféricas. Una de las propiedades más importantes de la onda dispersada es su intensidad, I por intensidad se entenderá el flujo de energía por unidad de área y sus unidades serán $W m^{-2}$ (Sobrino, 2000).

Para la luz natural incidente con intensidad I_o sobre una partícula esférica, la luz dispersada en cualquier dirección queda parcialmente polarizada y su intensidad viene dada por:

$$I = \frac{1}{2} \frac{(i_1 + i_2)}{r^2 k^2} I_o \quad (2.3)$$

Donde los términos i_1 e i_2 se refieren a la intensidad de la luz que vibra en los planos paralelo y perpendicular, respectivamente, k es el número de onda, r es la distancia de la partícula dispersora al observador.

El principal problema computacional en la teoría de Mie consiste en el cálculo de

$$i_1(\theta) = |S_1(\theta)|^2, i_2(\theta) = |S_2(\theta)|^2 \quad (2.4)$$

En función del ángulo de dispersión, del índice de refracción y el parámetro de tamaño.

Dicho cálculo puede realizarse a partir de las funciones de dispersión $S_1(\theta)$ y $S_2(\theta)$, quienes toman la siguiente forma:

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)], \quad (2.5)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [b_n \pi_n(\cos \theta) + a_n \tau(\cos \theta)], \quad (2.6)$$

$\pi_n(\cos \theta)$ y $\tau_n(\cos \theta)$ definidos a partir de los polinomios asociados de Legendre, a_n y b_n son denominados coeficientes de dispersión, obtenidos a partir de las soluciones de las ecuaciones de Maxwell.

$$\pi_n(\cos \theta) = \frac{1}{\sin \theta} P_n^1(\cos \theta), \tau_n(\cos \theta) = \frac{d}{d\theta} P_n^1(\cos \theta) \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{m\psi_n(mx)\psi_n'(x) - \psi_n(x)\psi_n'(mx)}{m\psi_n(mx)\xi_n'(x) - \xi_n(x)\psi_n'(xm)}, \\ b_n &= \frac{\psi_n(mx)\psi_n'(x) - m\psi_n(x)\psi_n'(xm)}{\psi_n(xm)\xi_n'(x) - m\xi_n(x)\psi_n'(xm)}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

Donde:

m , es el índice de refracción complejo.

X , parámetro de tamaño

ψ_n y ξ_n son las funciones de Riccati-Bessel, relacionadas con las funciones de Bessel esféricas.

2.2.5 Absorción atmosférica

La radiación electromagnética emitida por el sol se encuentra atenuada, por los componentes de la atmósfera terrestre, como moléculas y partículas, uno de los procesos de esta atenuación es la absorción. La definición de la absorción según Sobrino (2000) es la transformación energética sufrida por la radiación una vez que atraviesa el medio, como consecuencia de la misma existe una variación neta de los niveles energéticos de las

moléculas. Esta modificación se explica en el marco de la teoría cuántica, más especificaciones de esta teoría se encuentra en (Liou, 2002).

La atmósfera se comporta como un filtro selectivo a diversas longitudes de onda, de tal forma que en varias bandas del espectro elimina fundamentalmente cualquier probabilidad de observación remota. Los principales responsables de esta absorción son:

Oxígeno molecular (O_2), filtra las radiaciones ultravioletas por debajo de $0,1 \mu m$, así como pequeños sectores en el infrarrojo térmico y las micro-ondas.

Ozono (O_3), responsable de la supresión de la energía ultravioleta, inferior a $0,3 \mu m$, así como en un sector del micro-onda (en torno a $27 mm$).

Vapor de agua, con una fuerte absorción alrededor de $6 \mu m$ y otras menores entre $0,6$ y $2 \mu m$.

Dióxido de carbono (CO_2), que absorbe en el infrarrojo térmico ($>15 \mu m$), con relevantes efectos en el infrarrojo medio, entre $2,5$ y $4,5 \mu m$.

Aerosoles atmosféricos, “que principalmente absorben en el espectro visible” (Chuvienco, 1995).

La ecuación matemática que nos permita cuantificar la absorción se obtiene de la siguiente manera. Consideremos un medio no dispersor por el cual se propaga radiación electromagnética, y tomemos una capa de espesor ds situada perpendicularmente a la dirección de propagación de la radiancia L . como resultado del fenómeno de absorción ocurre una pérdida de la energía asociada a la onda debido a su conversión en otras formas de energía, en consecuencia la radiancia incidente sufre un cambio en su magnitud y pasa a ser $I + dI$, siendo dI :

$$dI = -\beta_{abs} Ids \quad (2.9)$$

“Esta ecuación nos permite definir el coeficiente de absorción en volumen $\beta_{abs}(\text{m}^{-1})$ que nos informa de la fracción de energía incidente que es absorbida en el medio” (Sobrino, 2000).

2.2.6 Ecuación de transferencia radiativa

La ecuación de transferencia radiativa gobierna el transporte de energía radiante en cualquier medio material. Su formulación está basada en el principio de conservación de energía (Sobrino, 2000).

Para entender de manera explícita el proceso de transferencia radiativa, se establece un modelo en la cual, una porción de radiación atraviesa un medio absorbente y dispersor.

Proceso esquematizado en la Figura 2.1.

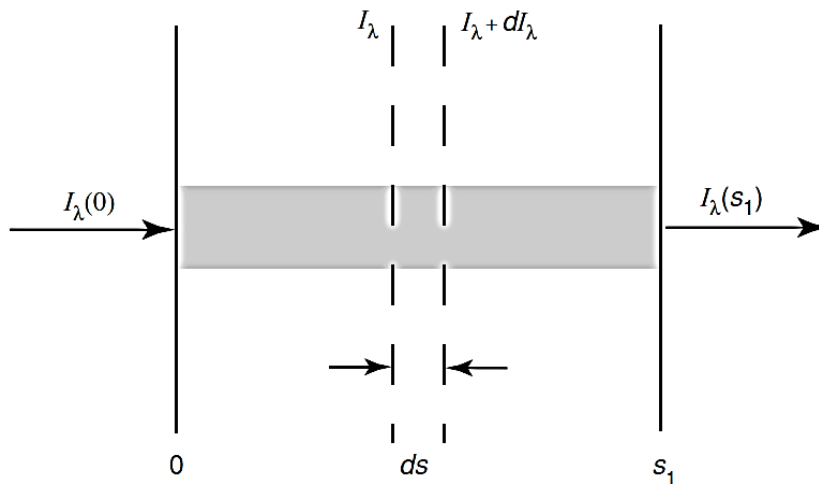


Figura 2.1. Reducción de la intensidad radiante al atravesar un medio de extinción (Liou, 2002).

Donde la intensidad de la radiación incidente (I_λ) después de atravesar el medio de espesor ds en la dirección de propagación se convertirá en $I_\lambda + dI_\lambda$, en la cual el termino dI_λ está dado por.

$$dI_\lambda = -K_\lambda \rho I_\lambda ds \quad (2.10)$$

Dónde: ρ ,es la densidad del medio

K_λ , es la sección eficaz de extinción para la longitud de onda (λ)

Esta disminución en intensidad es consecuencia justamente por absorción y dispersión del medio.

La intensidad también puede aumentar por emisión y por dispersión múltiple del material en la dirección del observador a la misma longitud de onda. Tal aumento está dado por.

$$dI_\lambda = j_\lambda \rho ds \quad (2.11)$$

Donde, j_λ es el coeficiente de la función fuente. Considerando las situaciones descritas anteriormente para la intensidad en el material se tiene.

$$dI_\lambda = -K_\lambda \rho I_\lambda ds + j_\lambda \rho ds \quad (2.12)$$

Luego reorganizando y definiendo convenientemente la función fuente obtenemos la siguiente expresión

$$\frac{dI_\lambda}{K_\lambda \rho ds} = -I_\lambda + J_\lambda \quad (2.13)$$

Esta es la ecuación de transferencia radiativa, en general sin ningún tipo de sistema de coordenadas impuesto, que es fundamental para la discusión de cualquier proceso de transferencia de radiación (Liou, 2002).

2.2.7 Ley de Lambert-Beer-Bouguer

Un caso particular de la ecuación de transferencia radiativa es, cuando se desprecia las contribuciones de emisión del sistema tierra atmosfera y la dispersión múltiple, entonces la ecuación (2.13) se reduce a

$$\frac{dI_\lambda}{K_\lambda \rho ds} = -I_\lambda \quad (2.14)$$

Si se realiza la integración de la ecuación anterior desde $S = 0$ que corresponde a la intensidad incidente, hasta una distancia S que corresponde a la intensidad emergente, obtenemos

$$I_{\lambda}(s) = I_{\lambda}(0) \exp\left(-\int_0^s K_{\lambda} \rho ds\right) \quad (2.15)$$

Suponiendo que el medio es homogéneo, de manera que K_{λ} es independiente de la distancia S , se llega a la expresión.

$$I_{\lambda}(s) = I_{\lambda}(0) e^{-K_{\lambda} \left(\int_0^s \rho ds\right)} \quad (2.16)$$

Esta ecuación se le conoce como la ley de Lambert-Beer- Bouguer: que establece que la disminución de la intensidad energética que atraviesa un medio homogéneo tiene un comportamiento exponencial (Liou, 2002).

2.3 Teledetección

El hombre en su incansable trabajo por entender el mundo que nos rodea, ha desarrollado técnicas y acumulado conocimientos que lo han permitido explorar el espacio aéreo, esto ha permitido al hombre mejorar la apreciación de la naturaleza. En este trayecto de desarrollo tecnológico nace la teledetección vocablo que deriva del Francés “télédétection”, traducción dada en 1967 al término anglosajón “remote sensing” o percepción remota (Sobrino, 2000). La cual etiqueta la definición siguiente “adquisición de información sobre un objeto a distancia, esto es, sin que exista contacto material entre el objeto o sistema observado y el observador” (Sobrino, 2000). Un ejemplo simple de este sistema de teledetección es la visión humana, que es muy sofisticado, pero también presenta algunas restricciones. Por un lado, se restringe por la sensibilidad espectral de nuestras propias células sensoras, que solo nos permiten ver un definido tipo de energía,

nombrado, por esta razón, espectro visible. Otras maneras de energía, como el calor no es perceptible de manera directa, por lo cual parece adecuado disponer de unos ojos artificiales que maximicen nuestra visión. Otra restricción de la visión humana es el campo de visión, que está reducido a su propia altura la cual no permite apreciar fenómenos muy extendidos como inundaciones o incendios, etc. Las dos restricciones fueron solucionadas con sensores colocados en plataformas situadas a una determinada altitud. Con ellos, se tiene acceso a tipos de energía no visible (ultravioleta, infrarrojo, micro-ondas), y a una nueva visión vertical y panorámica. Esta nueva técnica expande de forma notable nuestro entendimiento del medio que nos circunda, haciendo más fácil nuestra interpretación de los diversos procesos que están afectando al planeta (Chuvieco, 1995).

A partir de la perspectiva física la teledetección, parte del principio de la existencia de una perturbación (la energía electromagnética) que el sistema visto genera en el medio. Esta energía se transmite al sistema receptor que capta una señal que va a ser registrada, almacenada y luego interpretada.

La complejidad en trabajos involucrados con teledetección radica primordialmente en la transformación de los datos registrados por el sensor en magnitudes físicas.

Un sistema de teledetección espacial, incluye los siguientes recursos: fuente de energía, cubierta terrestre, sistema sensor, sistema de recepción-comercialización, interprete y usuario final.

En la actualidad la teledetección se ha convertido en una fuente poderosa para la adquisición de datos actualizados.

2.3.1 Ventajas y aplicaciones

Los métodos tradicionales (estaciones meteorológicas, campañas oceanográficas, aforos, muestreos de campo...) muestran datos puntuales, la teledetección en cambio con sensores colocados en plataformas cubren la totalidad del planeta y muestran datos sobre zonas remotas y de difícil acceso, además recoge información de grandes extensiones y casi instantáneamente.

La frecuencia temporal de datos proporcionados por los satélites permite el estudio de fenómenos dinámicos (atmósfera, océano), y la homogeneidad de datos permite estudios y análisis de áreas extensas, mientras que los datos tomados sobre el terreno a menudo proceden de sistemas de medición distintos y no siempre son comparables. Generalmente los datos se presentan al usuario en formato digital esto permite su fácil tratamiento.

La teledetección otorga datos sobre la superficie de la tierra que son de utilidad para especialistas en diferentes materias (geólogos, cartógrafos, hidrólogos, meteorólogos, etcétera.). Los mismos datos tienen la posibilidad de ser usados para aplicaciones diversas, por diferentes usuarios por lo cual abarata los costos de estudio.

2.3.2 Resolución de imágenes de satélite

La calidad de información por parte del sensor es indispensable para tener datos representativos del fenómeno estudiado, esta calidad depende de los componentes del sensor. Tales componentes le dan al sensor, cualidades particulares o habilidades para registrar y discriminar información a detalle. A estas cualidades se le conoce como resolución del sensor (Sobrino, 2000). El conocimiento de la resolución del sensor es importante, puesto que permite escoger el sensor adecuado para el tema en estudio.

a) Resolución espacial

Es la distancia sobre el terreno observado, la cual es el tamaño de la mínima unidad de imagen de la que tenemos información (Sobrino, 2000), tal distancia se calcula de la siguiente manera:

$$d = 2H \tan\left(\frac{IFOV}{2}\right) \quad (2.17)$$

En la cual, d es el tamaño del pixel, H la distancia del sensor a la superficie terrestre, IFOV (campo de visión instantánea) sección angular (en radianes) observada en un momento determinado.

El sensor depende de varios factores para tener una buena resolución espacial las cuales son: la altura orbital, la velocidad de exploración y el número de detectores. Como ejemplo, se tiene información de sensores con resolución desde 1 m (IKONOS-2) hasta 5000 m (Meteosat) (Sobrino, 2000).

b) Resolución espectral

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Es necesario contar con sensores que incluyan mayor número de bandas porque permiten caracterizar la superficie captada, además conviene que tales bandas sean lo suficientemente estrechas porque bandas muy amplias muestran datos promedios que pueden no ser representativo para el objeto observado (Chuvieco, 1995).

c) Resolución radiométrica

En general hace referencia a la sensibilidad del sensor, es decir la capacidad de discriminar entre pequeñas variaciones en la radiación que capta. En particular para sensores óptico-electrónicos, la imagen se presenta en formato digital gracias a una conversión analógica- digital realizado a bordo del satélite. Esa digitalización muestra un

rango de valores las cuales se llaman niveles digitales (ND) y el número máximo de niveles digitales se conoce como resolución radiométrica del sensor (Sobrino, 2000).

d) Resolución temporal

Es a la periodicidad con la que el sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. Tal periodicidad está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor, principalmente del ángulo de observación y de abertura (Sobrino, 2000).

2.4 Satélites artificiales y sensores

2.4.1 Satélite Terra

TERRA (EOS-AM) es un satélite artificial (Figura 2.2), producto de un trabajo multidisciplinario, multinacional que incluye Estados Unidos, Canadá y Japón. Controlado por la agencia GFSC administrado por la NASA. En diciembre de 1999, la NASA lanzo el satélite TERRA y desde el 24 de febrero del 2000 recolecta volúmenes de datos que serán usados en investigaciones científicas para entender la complejidad del planeta Tierra. TERRA como parte de EOS (Sistema de Observación Terrestre) está ayudando a los científicos a estudiar los misterios del clima y del cambio ambiental. Lleva a bordo cinco sensores: CERES, MISR, MODIS, estas tres creados por Estados Unidos; ASTER creada por Japón; MOPITT creado por Canadá. Estos instrumentos observan la atmósfera, el océano, la tierra, la nieve y el hielo de la tierra, y el balance de energía. “Tiene una órbita cuasi-polar y es Helio-sincrónica con una inclinación de 98.2° y está programado para pasar de norte a sur cruzando el ecuador a las 10:30 de la mañana en su órbita descendente” (Mas, 2011).

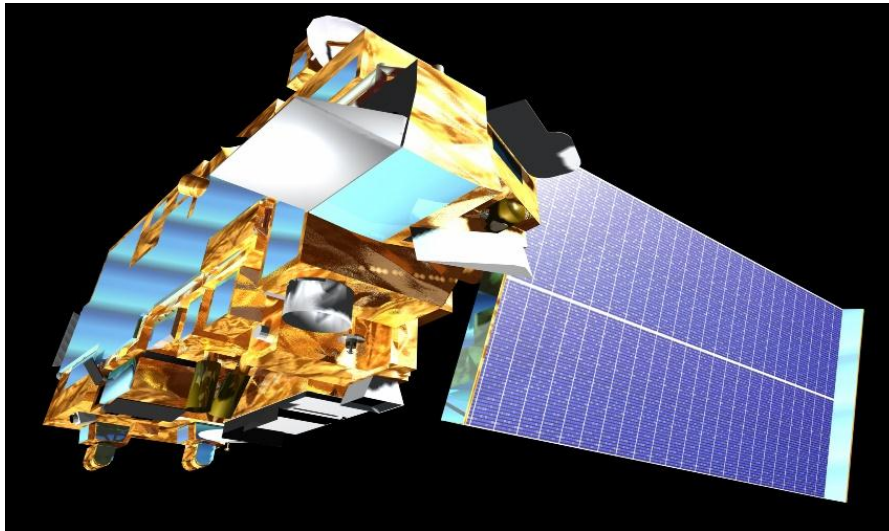


Figura 2.2. Satélite artificial Terra (Fuente <http://gmao.gsfc.nasa.gov/operations/candp/images/Terra.jpg>)

2.4.2 Satélite Aqua

El satélite artificial Aqua (EOS-PM) (Figura 2.3), es una misión científica de la NASA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y fue lanzado el 4 de mayo del 2002. Tiene una órbita cuasi-polar, es helio-sincrónica con una inclinación de 98° y una altitud media de 705Km . Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador a las 1:30 de la tarde (Mas, 2011), además lleva a bordo seis instrumentos, AIRS, AMSU-A, HAB, AMSR-E, MODIS y CERES. Dichos sensores obtienen información de los ciclos de agua de la Tierra; Evaporación de los mares, vapor de agua en la atmósfera, las nubes, la precipitación, la humedad del suelo, el hielo del océano y la tierra, la cobertura de nieve de la tierra y el hielo. Además, hay otras variables medidas por los instrumentos a bordo del satélite como son; flujos radiactivos de la energía, los aerosoles, la vegetación terrestre, el fitoplancton, la materia orgánica disuelta en los mares y aire, así como la temperatura del aire; de la tierra y del agua. Esta tarea pertenece a EOS.

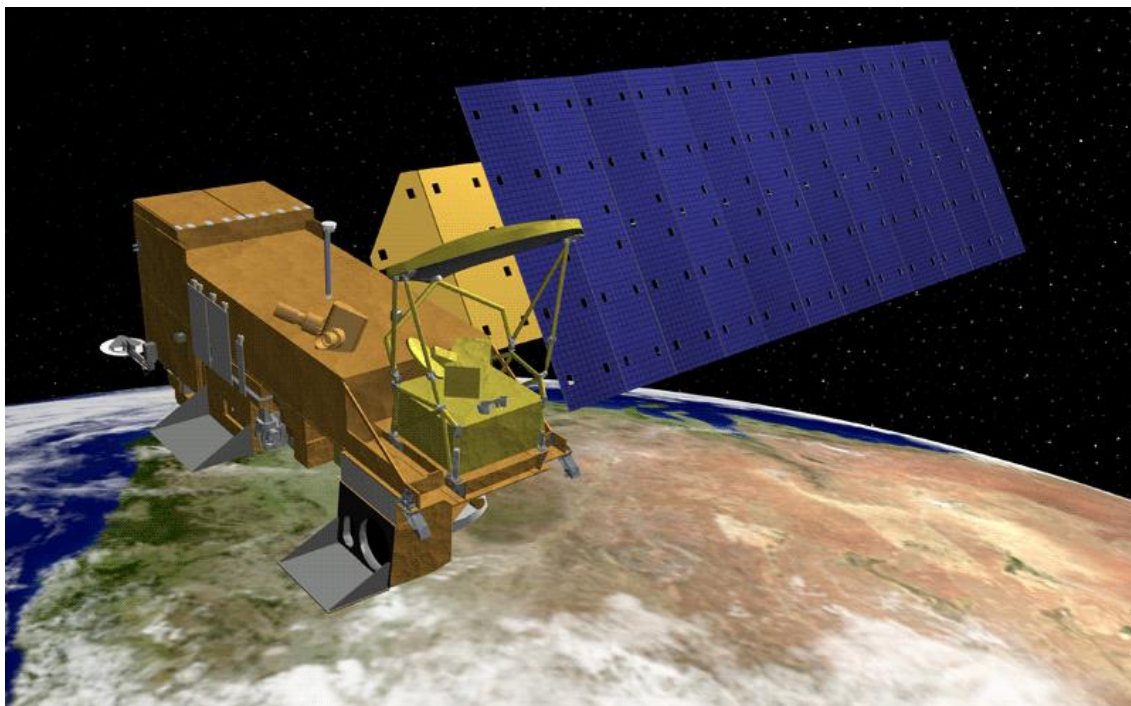


Figura 2.3. Satélite artificial Aqua (Fuente https://blog.executivebiz.com/wp-content/uploads/2012/05/aqua-lrg.en_.png)

2.4.3 Sensor MODIS

Los proyectos creados para monitorear la cobertura global han estado en marcha desde finales de la década de 1980, y de estos proyectos de teledetección, el más ambicioso es el Sistema de Observación de la Tierra (EOS) de la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio), cuyo principal objetivo es la observación continua del cambio global, incluidos estudios integrados de la atmósfera, los océanos y la superficie terrestre. En el proyecto EOS destaca un sensor denominado Espectrorradiómetro para imágenes de resolución moderada (Moderate Resolution Imaging spectroradiometer) MODIS sobre dos plataformas, que por sus propiedades espaciales y espectrales es útil para monitorear los procesos cambiantes de la Tierra, es uno de los sensores más importantes. MODIS fue diseñado por un equipo interdisciplinario de científicos con amplia experiencia en sensores remotos. El equipo trabajó durante aproximadamente 10 años para finalizar los requisitos para la recopilación, calibración y procesamiento de datos.

2.4.4 Especificaciones del sensor MODIS

El sensor MODIS está disponible en los satélites Terra o EOS-AM (lanzado en diciembre de 1999) y Aqua o EOS-PM (lanzado en mayo de 2002). Ambas plataformas monitorean toda la superficie de la tierra cada uno o dos días dependiendo de la latitud.

El instrumento MODIS tiene una alta sensibilidad de medición de radiación (12 bit) en 36 bandas espectrales, en el rango de longitud de onda que va de los $0.4\mu m$ a los $14.4\mu m$ (ver Tabla 2.2). Las primeras 19 bandas están posicionadas en la región del espectro electromagnético situado entre $0.405\mu m$ y $2.155\mu m$. Las bandas de la 1 a la 7 son útiles para las aplicaciones terrestres; las bandas de 8 a la 16 para las observaciones oceánicas y las bandas 17 a 19 para las mediciones atmosféricas. Las bandas 20 a la 36, cubren la porción del infrarrojo térmico del espectro de $(3,660-14,385\text{ nm})$. Dos bandas son tomadas a una resolución nominal de $250m$ al nadir, cinco bandas a $500m$ y las 29 bandas restantes a 1 km . MODIS posee una alta calidad geométrica que permite el monitoreo preciso de las alteraciones de la superficie terrestre.

El sensor MODIS es un escáner de barrido: un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la órbita con un ángulo de $\pm 55^\circ$ permite explorar la franja de tierra a ambos lados de la trayectoria del satélite, cuyo ancho es de $2,330\text{ km}$ (Ver Figura 2.4). El sistema óptico es un telescopio con dos espejos fuera de su eje focal que dirigen la radiación a cuatro sistemas ópticos reflectantes, uno para cada región espectral (visible, infrarrojo cercano, medio y térmico). Se utiliza una nueva tecnología de fotodiodos de silicio para las bandas visible e infrarrojo cercano. Para el infrarrojo térmico se usan detectores de Telureto de Mercurio-Cadmio (HgCdTe).

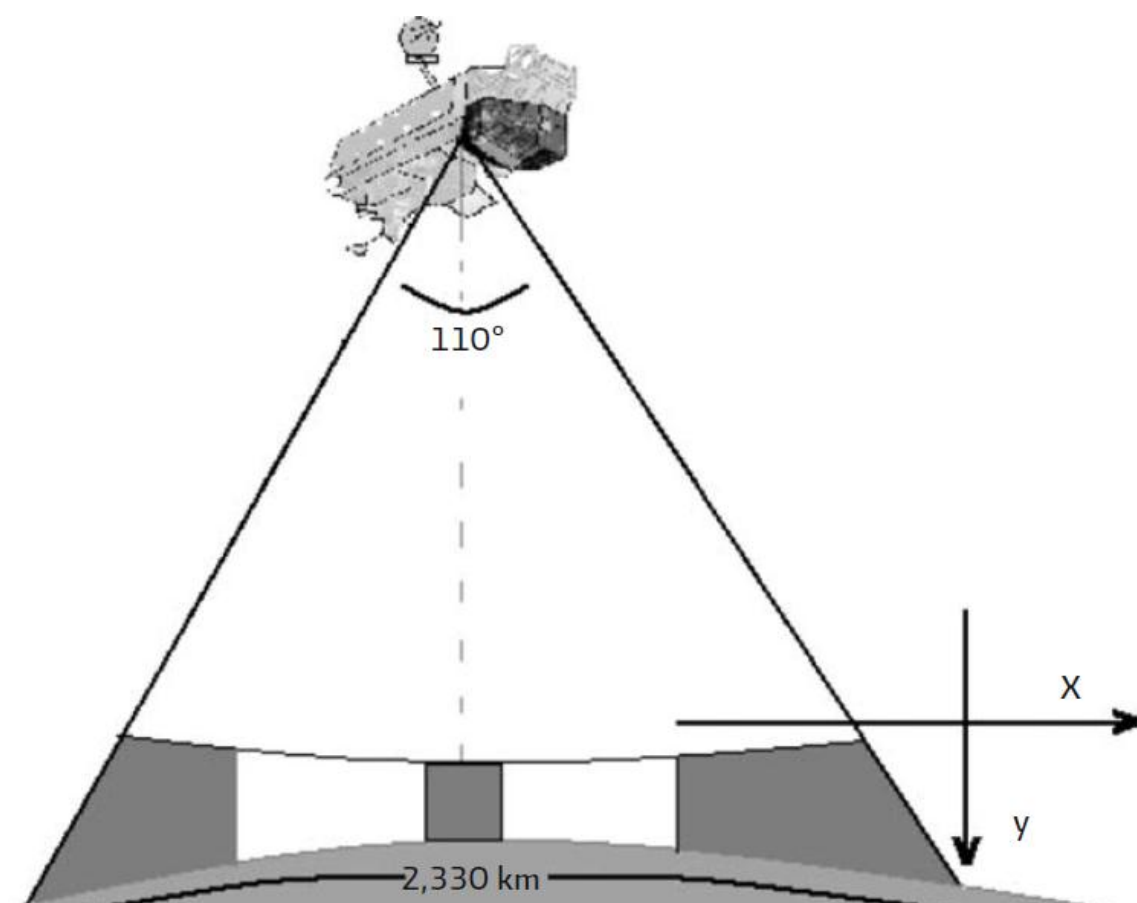


Figura 2.4. Angulo de visión del sensor MODIS (Mas, 2011).

Tabla 2.2*Características de las bandas espectrales del sensor MODIS*

Uso principal	Banda	Ancho de banda¹	Radiancia espectral²
Límites de Tierra/ Nubes/aerosoles	1	620-670	21.8
	2	841-876	24.7
Propiedades de Tierra/ Nubes/aerosoles	3	459-479	35.3
	4	545-565	29.0
	5	1230-1250	5.4
	6	1628-1652	7.3
	7	2105-2155	1.0
Color del océano/ fitoplancton /biogeoquímica	8	405-420	44.9
	9	438-448	41.9
	10	483-493	32.1
	11	526-536	27.9
	12	546-556	21.0
	13	662-672	9.5
	14	673-683	8.7
	15	743-753	10.2
Vapor de agua atmosférico	16	862-877	6.2
	17	890-920	10.0
	18	931-941	3.6
Vapor de agua atmosférico	19	915-965	15.0
	20	3.660-3.840	0.45(300K)
	21	3.929-3.989	2.38(335k)
Temperatura atmosférica	22	3.929-3.989	0.67(300k)
	23	4.020-4.080	0.79(300k)
	24	4.433-4.498	0.17(250k)
Vapor de agua de nubes Cirrus	25	4.482-4.549	0.59(275k)
	26	1.360-1.390	6.00
Propiedades de las nubes	27	6.535-6.895	1.16(240k)
	28	7.175-7.475	2.18(250k)
	29	8.400-8.700	9.58(300k)
Ozono	30	9.580-9.880	3.69(250k)
Temperatura de la superficie/nubes	31	10.780-11.280	9.55(300k)
	32	11.770-12.270	8.94(300k)
Altitud de las nubes	33	13.185-13.485	4.52(260k)
	34	13.485-13.785	3.76(250k)
	35	13.785-14.085	3.11(240k)
	36	14.085-14.385	2.08(220k)

Nota. ¹ Bandas de la 1 a la 19 están en *nm*; Bandas de la 20 a la 36 en *μm*.

² Los valores de radiancia espectral están en $\text{w/m}^2 \text{sr}$

(Fuente <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>).

2.4.5 Componentes del sensor MODIS

a) Mainframe

El Mainframe, también llamado el principal componente estructural, es la columna vertebral del instrumento, es el apoyo a un total de 185kg de peso. La integridad estructural es muy importante en MODIS Terra/Aqua pues se requieren cambiar periódicamente su orientación para ver el sol, la luna, o el espacio profundo, o para realizar diversas maniobras que van a cambiar la ubicación de la presión gravitacional en el Mainframe.

b) El espejo de escaneo

El espejo de escaneo es uno de los componentes más importantes de MODIS, pues dirige la luz reflejada por la superficie terrestre hacia el conjunto de plano focal. Es esencial para la exactitud de los datos MODIS que las dos caras del espejo de escaneo estén libre de defectos y que las superficies idénticas sean lo más cerca posible. Para ello, los científicos tomaron muchas variables en el diseño, tales como los materiales utilizados en su construcción, los revestimientos reflectantes utilizados, la fuerza del marco del espejo, y su peso.

c) Refrigerador de radiación pasiva

Es una unidad diseñada para enfriar el conjunto plano focal a 83°K , Al mismo tiempo, el refrigerador de radiación pasiva rechazará 136 mW de potencia. El enfriador pesa 11kg, y se compone de aluminio, Kel-F, magnesio, invar, aislantes térmicos de vidrio-epoxi, y acero inoxidable. El funcionamiento del refrigerador se da en tres etapas frío, intermedio, inicial. En la etapa frío, la temperatura puede bajar hasta los 74°K bajo condiciones sin carga. En la etapa intermedia, la temperatura se estabiliza a 130°K , y finalmente, en la etapa inicial, la temperatura alcanza los 230°K .

d) Conjuntos de plano focal (FPAs)

El diseño de los conjuntos plano focal (FPAs) incluye 36 bandas espectrales distintas y separadas en cuatro FPAs: Visible (VIS), infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo de onda corto y mediano (SWIR/MWIR), infrarrojo de onda larga (LWIR). Cada FPA enfoca la luz en una cierta sección del detector de pixel, que son relativamente grande, que van desde un cuadrado de $135\mu m$ a $540\mu m$. El gran número y variedad de detectores de pixeles hacen posible que los datos MODIS sean diversos. Cuando la luz impacta un detector de pixel, se generará una señal distinta dependiendo del tipo de luz a que es sensible. Los datos que generan los pixeles sirven a los científicos para hacer diversos estudios como la superficie de la tierra, las superficies de agua y atmósfera.

e) Conjunto de puertas

Cada instrumento MODIS tiene tres puertas que protegen los componentes de la contaminación, el daño, y en algunos casos ayudar a los procesos de auto calibración del instrumento.

La puerta que está orientado a la tierra cubre la abertura de MODIS, que se enfrenta a las superficies de la tierra. Esta puerta normalmente permanece abierta, y al estar abierto contribuye a que los datos MODIS estén libre de contaminación por dispersión óptica. Cuando la puerta está cerrada impide el ingreso de datos al instrumento y esta es el modo seguro del instrumento. El interior de la puerta está pintado de negro para minimizar la dispersión óptica, mientras que el exterior está pintado de blanco para ayudar a controlar la temperatura del instrumento.

La puerta orientada al sol, cubre la abertura de MODIS que enfrenta al Sol. Esta puerta tiene también una pantalla óptica que funciona independientemente de la puerta que regula la energía solar para alcanzar el difusor solar. Las puertas y la pantalla pueden estar ambos abiertas, o ambos cerrados, o que la puerta esté abierta y la pantalla cerrada. Esta

última posición es la más común, ya que permite el control de la contaminación y la calibración.

La puerta de vista al espacio cubre la abertura que observa las extensiones del espacio. Esta puerta tiene dos funciones; limitar la contaminación e impedir que la energía proveniente de los planetas llegue al refrigerador radiativo. La superficie interna de esta puerta está diseñada para limitar el campo del refrigerador de etapa intermedia y así evitar la contaminación de los datos de otras fuentes de energía radiante. La parte externa está pintada de blanco para ayudar al equilibrio térmico

(Fuente <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/components.php>).

2.4.6 Las colecciones

A medida que se refinan o corrigen los algoritmos de producción, se crean versiones (o colecciones) mejoradas. Se procesan todos los productos archivados, incluidos los productos de fechas anteriores, por lo que las colecciones más nuevas funcionan mejor (Mas, 2011).

2.4.7 Identificación de productos

“Los productos MODIS se nombran a través de la convención adoptada por la NASA. Las diferentes porciones del nombre del archivo permiten conocer la plataforma, el nombre del producto, su fecha de adquisición, versión y localización” (Mas, 2011).

Ejemplo

MOD14.A2007364.1805.005.2009047020343.HDF

1. Las tres primeras letras hacen referencia a la plataforma (MOD)
2. Después de la letra A aparece la fecha de adquisición (año y día juliano)

3. En los productos en gránulos (nivel 2) sigue la hora (hora, minutos) del inicio de la colecta de datos.
4. Sigue la versión de procesamiento o colección
5. Finalmente aparece la fecha de procesamiento (año, día juliano, hora, minuto y segundo):

2.4.8 Creación de imagen digital

En la Figura 2.5 podemos apreciar cómo se generan una imagen digital a partir de una escena. El proceso inicial es, la interacción de la escena con el sistema físico (sistema óptico), esto se da gracias a la fuente de energía electromagnética (sol). Luego la onda electromagnética reflejada por la escena es clasificada por diversos filtros incorporados en el sistema, una vez clasifica se direcciona a cada sensor. La función del sensor es transformar la radiación electromagnética incidente en una señal de voltaje, esta señal de voltaje se introduce a un convertidor analógico digital, que lo discretiza en una escala que usualmente va de 0 a 255, es decir 256 posibles niveles, este número es alcanzable en un byte de 8 bits de una computadora digital. Como cada sensor es sensible a una cierta región del espectro electromagnético se generan bandas, para el caso 4, cada banda está formada por pixeles que es la mínima unidad de información de una imagen digital (Chávez, 2010).

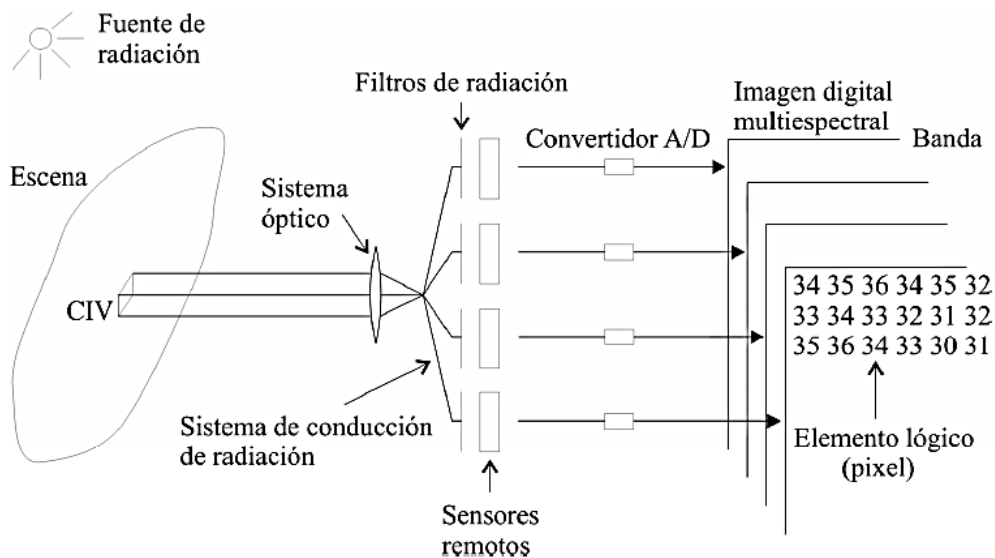


Figura 2.5. Proceso de digitalización de una imagen a partir de una escena
(Chávez, 2010)

2.5 Espesor óptico de los aerosoles

2.5.1 ¿Qué es el espesor óptico de los aerosoles?

Es un parámetro adimensional (AOT, por sus siglas en inglés), también llamado profundidad óptica de los aerosoles (AOD, por sus siglas en inglés), que mide el grado extinción de la radiación solar debido a la interacción de la radiación con partículas de aerosol en la atmósfera, tal interacción es precisamente por los procesos de absorción y dispersión. Por tanto (AOT) es un indicador de partículas suspendidas en la atmósfera, además es un parámetro clave para medir la carga de aerosoles en una columna atmosférica en dirección vertical (Llamas et al., 2013; Wei et al., 2020; Shen et al., 2020).

2.5.2 Cálculo de AOT a partir de datos satelitales

La transferencia radiativa es el principio de teledetección para detectar aerosoles y en esta sección se discutirá su uso para calcular el espesor óptico de los aerosoles (τ).

La ecuación básica de transferencia de radiación para atmósferas plano paralelas está dado por:

$$\frac{dI_{\lambda}}{K_{\lambda}\rho ds} = -I_{\lambda} + J_{\lambda} \quad (2.18)$$

Reescribamos esta ecuación para aplicaciones de satélite

$$\mu \frac{dI(\tau; \mu, \phi)}{d\tau} = I(\tau; \mu, \phi) - J(\tau; \mu, \phi) \quad (2.19)$$

Donde, ϕ es el ángulo azimut, τ espesor óptico de aerosoles y $\mu = \cos \theta$; θ ángulo cenital satelital.

Para buscar una solución para la ecuación anterior vamos a separar en atmósfera y la superficie, luego supongamos que no hay intensidades difusas de la parte superior e inferior de la atmósfera bajo esa condición, la intensidad reflejada en el tope de la atmósfera se puede expresar en términos de la ecuación integral de la siguiente manera

$$I(0; \mu, \phi) = \int_0^{\tau} J(\tau'; \mu, \phi) e^{-\tau'/\mu} \frac{d\tau'}{\mu} \quad (2.20)$$

Y si usamos aproximaciones de una sola dispersión y consideramos una atmósfera tal que su profundidad óptica es extremadamente pequeña, la reflectancia bidireccional resultante es:

$$R(\mu, \phi; \mu_o, \phi_o) = \frac{\varpi \tau}{4\mu\mu_o} P(\mu, \phi; -\mu_o, \phi_o) \quad (2.21)$$

Donde, R es la reflectancia bidireccional, ϖ albedo de dispersión simple, P función de fase y $\mu = \cos \theta_o$; ángulo cenital solar.

Consideremos ahora una superficie subyacente y tomemos en cuenta las reflexiones múltiples entre la atmósfera y la superficie. Para facilitar la presentación consideremos una superficie lambertiana con un albedo r_s , ahora la reflectancia bidireccional (Figura 2.6) para atmósfera y superficie, combinada en el tope de la atmósfera, bajo estas

consideraciones será, una suma de todos los haces emergentes hacia ella, por lo tanto, tenemos:

$$\begin{aligned}
 R &= R_a + \tilde{T}_a r_s \tilde{T}_a^* + \tilde{T}_a r_s R_a^* r_s \tilde{T}_a^* + \dots \\
 &= R_a + \frac{\tilde{T}_a r_s \tilde{T}_a^*}{1 - R_a^* r_s}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

Donde, R_a representa la reflectancia bidireccional de la atmósfera, el término seguido representa la contribución de la superficie, $\tilde{T}_a$ función de transmisión total desde el sol a la superficie y $\tilde{T}_a^*$ función de transmisión total desde la superficie hasta el satélite. Esta ecuación sirve como ecuación fundamental para la determinación de los aerosoles y ozono en la atmósfera, pues modela la reflectancia que ve el sensor a bordo de satélites artificiales (Liou, 2002).

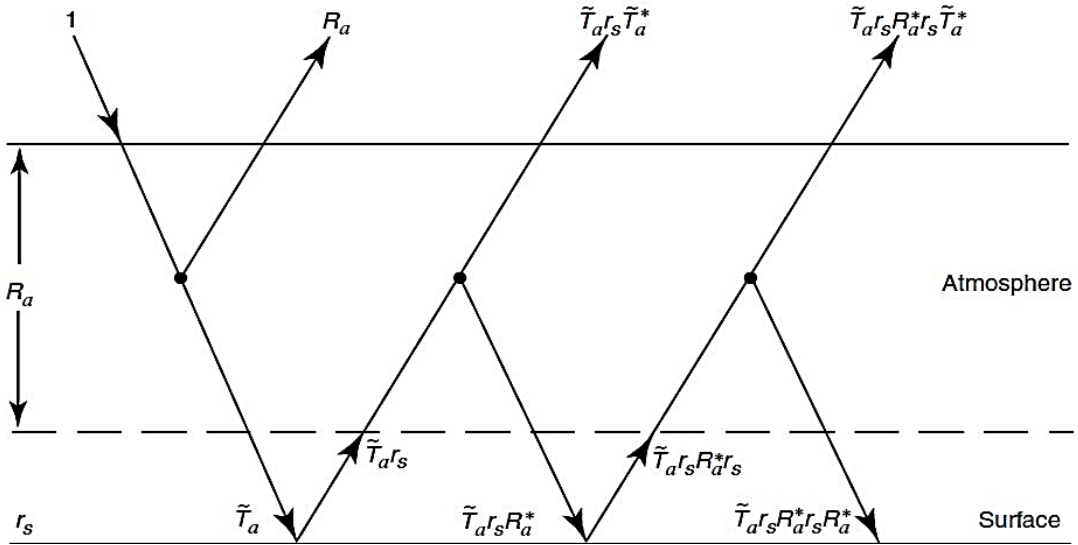


Figura 2.6. Contribución de la reflectancia bidireccional del sistema atmósfera-superficie. (Liou, 2002).

La recuperación del espesor óptico de los aerosoles desde mediciones de satélite usando la luz reflejada es una tarea difícil, debido a la influencia relativamente pequeña de los aerosoles, se complica más a un por la variabilidad de la superficie de la tierra (Liou, 2002).

A modo de ejemplo vamos a recuperar el espesor óptico de los aerosoles para el caso más simple, esta situación sería una superficie de color negro que no hace ninguna contribución a la intensidad dispersa, en este caso podemos utilizar la ecuación (2.21).

$$R(\mu, \phi; \mu_o, \phi_o) = \frac{\varpi \tau}{4\mu\mu_o} P(\mu, \phi; -\mu_o, \phi_o) \quad (2.23)$$

Descrita anteriormente la cual se obtuvo sin considerar las contribuciones de la superficie.

De modo que el espesor óptico de los aerosoles es determinado por.

$$\tau = \frac{R(\mu, \phi; \mu_o, \phi_o)}{P(\mu, \phi; \mu_o, \phi_o)} \frac{4\mu\mu_o}{\varpi} , \quad (2.24)$$

Por lo tanto, el espesor óptico de los aerosoles (τ) depende de R la cual varía de acuerdo a la medida del sensor puesto en satélite. La función de fase (p) y ϖ deben ser asumidos o parametrizados de otra información.

2.5.3 Algoritmo utilizado para obtener el espesor óptico de los aerosoles a partir de MODIS

En este apartado se describirá el algoritmo para la obtención del espesor óptico de los aerosoles, la cual hace uso de la reflectancia espectral observada por MODIS. Tal algoritmo está separado en dos algoritmos independientes, uno para propiedades del aerosol sobre océano y el otro sobre Tierra. La base teórica de los algoritmos hasta ahora no ha cambiado, aunque algunos de los mecanismos y los detalles de los algoritmos han evolucionado. Los dos algoritmos se describen a detalle en (Remer et al., 2006).

Primero se describirá el algoritmo para aerosol sobre océano, este algoritmo utiliza cajas de $10km \times 10km$ obtenidos de los gránulos diurnos observados por MODIS, cada caja contiene 100 pixeles de $1km$ o 400 pixeles de $500m$, de aquí el algoritmo continúa si la caja de pixeles está libre de pixeles terrestres, si ay errores fatales deja de funcionar.

El algoritmo tiene la ardua tarea de separar los pixeles buenos de los nublados utilizando la máscara de nubes, luego el algoritmo ordena los pixeles restantes que han evadido todas las máscaras de nubes y máscaras de sedimentos, de estos pixeles restantes se descarta el 25% más oscuros y 25% más brillantes y por lo tanto deja el 50% de datos, este filtro se utiliza para eliminar la contaminación residual de nubes, sombras de nubes u otras condiciones extremas inusuales en la caja.

Los indicadores de control de calidad del algoritmo asignan valores particulares cuando encuentra errores, además advierte sobre cualquier pixel de agua dentro del cuadro. El control de calidad varía de 3 a 0 donde 3 es buena calidad y 0 mala calidad, luego de los diferentes filtros el algoritmo compara la reflectancia espectral calculada a partir de los modelos de la tabla de consulta con la reflectancia medida por MODIS para encontrar el mejor ajuste mediante mínimos cuadrados,

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{\lambda=1}^6 N_{\lambda} \left(\frac{\rho_{\lambda} - \rho_{\lambda}^m}{\rho_{\lambda} - \rho_{\lambda}^{ray} + 0.01} \right)^2}{\sum_{\lambda=1}^6 N_{\lambda}}} \quad (2.25)$$

Donde N_{λ} es la suma de pixeles buenos en la longitud de onda λ , ρ_{λ} es la reflectancia medida por MODIS en la longitud de onda λ , ρ_{λ}^{ray} es la reflectancia aportada por la dispersión de Rayleigh, y ρ_{λ}^m es la reflectancia calculada de la combinación de modelos de tabla de consulta, de aquí el mejor ajuste promedio es la solución a la inversión. Obteniéndose el espesor óptico total a $0.55\mu m$, de la variedad de productos obtenidos se tiene un grupo de productos conjunto terrestre y oceánico por ejemplo: **Image Optical_Depth_Land_And_Ocean** que está diseñado para un usuario que desea mostrar imágenes vistas de espesor óptico de aerosoles, el producto **Optical_Depth_Land_And_Ocean** tiene un control más estricto y está destinado a usuarios que esperan una mayor confianza cuantitativa en las recuperaciones individuales

de 10km sobre tierra (Remer et al., 2006) y el producto de contribución de aerosol fina Optical_ Depth_ Ratio_ Small_ Land_ And_ Ocean (Remer et al., 2006).

A Continuaron se describirá el algoritmo para propiedades de aerosol sobre tierra. Al igual que para el algoritmo descrito para océano se tomarán cajas de $10km \times 10km$ que contienen grupos de pixeles de 100 o 400, estos grupos de pixeles varían de acuerdo a la resolución espacial 250 m, 500 m y 1 km, la elección de la resolución dependerá de acuerdo al canal que utilice, luego se evalúan pixel por pixel para identificar si el pixel es adecuado para la recuperación de aerosol. Pixeles con nubes, nieve, hielo y las masas de agua continentales se consideran no adecuados y se descartan, de los pixeles sobrantes se descartan el 50% de los más claros y el 20% de los más oscuros, si quedan al menos 12 pixeles se utiliza el procedimiento de inversión para superficies oscuras pero si quedan menos de 12 pixeles sigue el procedimientos de recuperación alternativa para superficies más brillantes, luego se calculan las reflectancias en los canales visibles y se relacionan entre ellas, de la relación entre ellas se obtiene una sola reflectancia que representa a MODIS, en ambos procedimientos se compara con la reflectancia ordenada para el tope de la atmósfera.

$$\rho - \rho^{TOA} = \varepsilon \quad (2.26)$$

Donde, ρ es la reflectancia medida por el sensor y ρ^{TOA} reflectancia en el tope de la atmósfera modelada. El algoritmo minimiza la diferencia entre las reflectancias, una vez hecha la comparación se procede a la inversión de (AOD) a $0.55\mu m$ (Remer et al., 2006)

ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio corresponde al territorio de la región de Ayacucho, el cual se encuentra ubicada entre las latitudes (-11.9,-15.75) y longitudes (-72.5,-75.5) como se muestra en la Figura 3.1.

La región de Ayacucho tiene 11 provincias y 119 distritos. Su capital es Ayacucho, limita al norte con la provincia de Junín; al este con las provincias de Cusco y Apurímac; al sur con la provincia de Arequipa, al oeste se encuentran las provincias de Ica y Huancavelica (INEI, 2018), según el censo de 2017, la población urbana es de 358045 personas, lo que representa el 58,1% de la población total; mientras que la población rural, cuenta con 258131 habitantes, lo que representa el 41,9% (INEI, 2018).

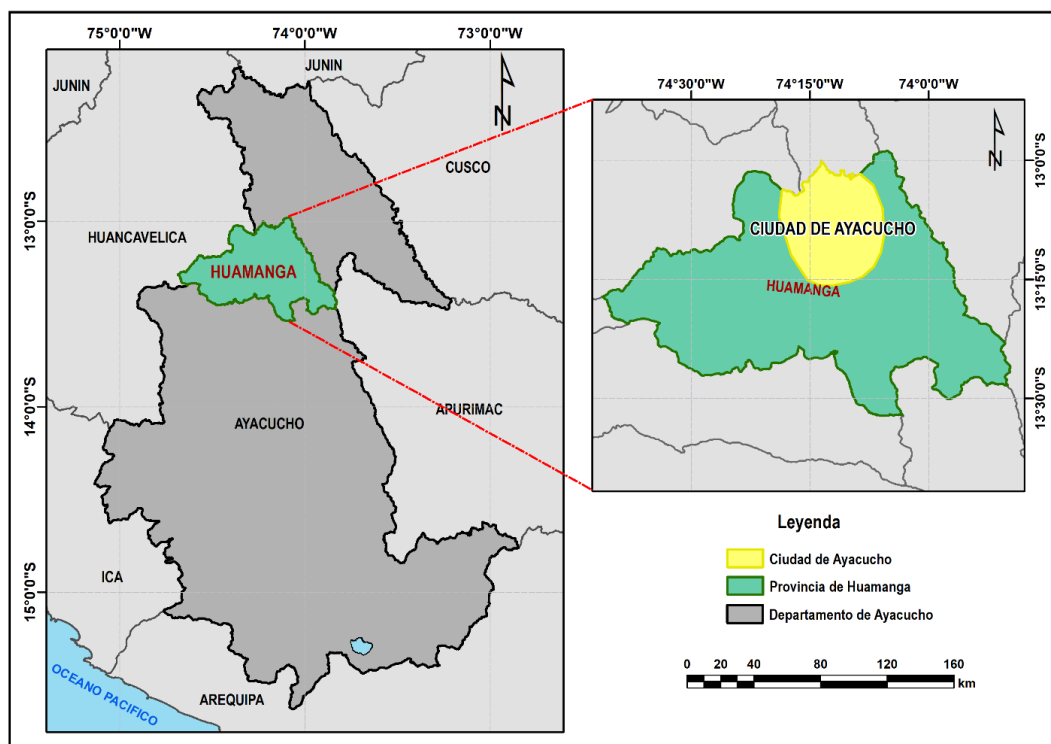


Figura 3.1. Mapa de ubicación (Fuente: Elaboración Propia).

3.2 Geografía

Ayacucho está ubicada en la región central de los Andes. Los ríos que atraviesan su territorio forman valles y cañones profundos, y los principales Mantaro, Apurímac y Pampas pertenecen a la cuenca del Amazonas. La temporada de lluvias es de enero a marzo donde aumenta enormemente el caudal de los ríos (Info, 2014), su territorio también incluye la selva. En cuanto a la altitud Ayacucho se encuentra entre 491 metros sobre el nivel del mar (Santa Rosa distrito de Canayre en Huanta) y 5505 metros sobre el nivel del mar (Sara Sara, Distrito Puyusca-Provincia Parinacochas) (INEI, 2018)

3.3 Clima

Los Andes son un factor decisivo en las características climáticas de la región de Ayacucho. La temperatura y la humedad disminuyen con el aumento de la altitud, desde los cálidos Yungas occidentales hasta las heladas temperaturas de las montañas nevadas, como Sara-Sara. Por encima de Yunga está la región quechua, con un clima templado y dos estaciones distintas: la estación seca, de abril a diciembre, y la estación lluviosa, de enero a marzo. Extendiéndose sobre un terreno elevado (punas) de 4000 metros sobre el nivel del mar donde la temperatura nocturna desciende aún más. Luego de pasar los picos de la cordillera, esta secuencia se repite en sentido contrario hasta llegar a la zona de selva alta en el límite oriental de la región Ayacucho (Info, 2014)

En la ciudad de Ayacucho y en toda la región, la temperatura más alta se da en los meses de octubre y noviembre, alcanzando un máximo de 30°C, debido a la gran cantidad de radiación solar que incide en el suelo durante este período y el suelo seco (Info, 2014).

DATOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADOS

4.1 Datos imágenes diarios de AOD del sensor MODIS-Terra y Aqua

Los datos imágenes de aerosoles son proporcionadas por el sensor MODIS (Espectro radiómetro de imagen de resolución moderada) que está a bordo de los satélites Terra y Aqua, visualizando la superficie de la tierra cada 1 o 2 días. Las imágenes de MODIS/Terra están disponibles desde 1999 hasta la actualidad pasando por el Ecuador a las 10:30 de la mañana y MODIS/Aqua desde 2002 hasta la actualidad pasando por el Ecuador a las 1:30 de la tarde (Mas, 2011). En esta investigación usaremos los productos MOD04-3k y MYD04-3k de la colección 6.1 que es una versión mejorada que los productos MODIS L1, L2 y L3; con estas imágenes se puede monitorear el espesor óptico de aerosoles, concentración de masa, flujos reflejados y transmitidos. También se cuentan con imágenes productos de aerosoles MOD04-L2 y MYD04-L2 que tienen una resolución espacial de 10km, que son destinados para estudios globales de la Tierra. Por la alta demanda de investigadores de la atmósfera local, la plataforma LAADS DAAC generó imágenes productos de aerosoles MOD04-3k y MYD04-3k con resolución espacial de 3km (DAAC, 2020). La plataforma LAADS DAAC fue creada en 2007 para distribuir una serie de parámetros geofísicos generados de las imágenes MODIS, con la finalidad de monitorear la superficie de la tierra y la atmosfera.

4.2 Calidad de los datos imágenes de AOD MODIS- Terra y Aqua

Las propiedades ópticas de los aerosoles son monitoreadas desde tierra con fotómetros solares CIMEL, esta red de 499 fotómetros distribuidos en todo el planeta se conoce como AERONET (Aerosol RObotic NETwork). El objetivo de AERONET es determinar

características ópticas de los aerosoles y validar datos satelitales. (Otero et al., 2006), El espesor óptico de aerosoles AOD de MODIS contiene datos conjuntos “*Optical Depth Land and Ocean*” a 550nm de calidad (QA =3) a una resolución espacial de 3km que combina la aplicación del algoritmo en ambas superficies (Díaz, 2012).

4.3 Programas utilizados.

a) ENVI5.3+ IDL8.5

ENVI es un software generado en el lenguaje de programación IDL, y es ideal para la visualización, análisis y presentación de todo tipo de imágenes digitales. Es un paquete completo que permite realizar corrección geométrica, análisis de terreno, análisis de radar y vector de SIG. Incluye también todas las funciones básicas de procesamiento de imagen y además se complementa con una amplia biblioteca de algoritmos de procesamiento.

Otra de las bondades de ENVI es que es capaz de procesar datos multiespectrales o hiperespectrales como, por ejemplo, datos del sensor MODIS y cuenta con una flexibilidad que permitir la implementación de estrategias de análisis personalizados (información obtenida de la ayuda del programa).

b) ArcGIS 10.8

ArcGIS es un programa ampliamente utilizado para la presentación de mapas temáticos, hoy en día es una plataforma líder mundial que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica (SIG), y ahora está disponible en cualquier lugar a través de navegadores web. (ArcGIS Resources, 2020), Además ArcGIS es un programa con la capacidad para almacenar grandes masas de información geo referenciadas y es eficaz para problemas de planificación y gestión, por lo que es idóneo para la toma de decisiones (Jiménez, 2006).

METODOLOGÍA

En este capítulo describiremos los procesos desarrollados para la obtención de los resultados de la tesis. Resumiremos toda la metodología en dos secciones, tal como se indica a continuación.

5.1 Adquisición de imágenes MOD04_3k y MYD04_3k

Para adquisición de las imágenes MOD04_3k y MYD04_3k se requiere de una previa suscripción en la plataforma EARTHDATA (<https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), el cual permite obtener un usuario (username) y una contraseña (password), luego de tener estos datos podemos iniciar sesión en EARTHDATA. En la opción de Centro de Archivo Activo Distribuidos (Other DAACs) elegimos LAADS DAAC (Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System Distributed Active Archive Center). En LAADS DAAC encontramos diversos productos del sensor MODIS en las colecciones 6 y 6.1, para este trabajo seleccionamos la colección 6.1 debido a que contiene las imágenes de aerosoles, a continuación, seleccionamos el producto MYD04-3k y MOD04-3k que corresponde a MODIS/Aqua y MODIS/Terra respectivamente, ambas de resolución espacial de 3 km que es adecuado para el estudio de la región de Ayacucho; también se cuentan con productos MOD04-L2 y MYD04-L2 de resolución espacial de 10 km que son utilizados para estudios globales. Seguidamente ingresamos el periodo de la descarga, indicando el año, mes y día. A continuación, seleccionamos el área de interés (región de Ayacucho) que corresponde a las latitudes (-11.9,-15.75) y longitudes (-72.5, -75.5) y finalmente en la opción de Archivo nos muestra todas las imágenes en formato hdf cuyas especificaciones se muestra en la Figura 5.1.

MYD04_3K - MODIS / Aqua Aerosol 5-Min L2 Franja 3km	
Visión general Información del Producto Disponibilidad de datos	
Nombre corto:	MYD04_3K
Plataforma:	Agua
Instrumento:	MODIS
Nivel de procesamiento:	Nivel 2
Resolución espacial:	3 kilómetros
Resolución temporal:	5 minutos
ArchiveSets:	61
Colección:	Colección MODIS 6.1 - Nivel 1, Atmósfera, Tierra (ArchiveSet 61)
Número de PGE:	PGE04
Convención de nomenclatura de archivos:	MYD04_3K.AYYYYDD.HHMM.CCC.YYYDDDHMMSS.hdf • AYYYYDD = año y día del año de adquisición • HHMM = Hora y Minuto de adquisición • CCC = Número de colección • YYYDDDHMMSS = Fecha y hora de producción
Citación:	Levy, R., Hsu, C., et al., 2015. Producto en aerosol MODIS Atmosphere L2. Sistema de procesamiento adaptativo MODIS de la NASA, Goddard Space Flight Center, EE. UU .: http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MYD04_L2.061
Palabras clave:	Cambio climático, corrección atmosférica, profundidad / grosor óptico del aerosol

Figura 5.1. Información del producto MODIS Aqua

5.2 Procesamiento de las imágenes MOD04_3k y MYD04_3k

El procesamiento de las imágenes, se realiza en dos partes: primero en la plataforma LAADS DAAC y la segunda parte en el software ENVI5.3+IDL8.5, a continuación, detallamos cada uno de ellos.

a) LAADS DAAC

Primero: Seleccionamos todas las imágenes de extensión hdf, luego en la opción Sds seleccionamos el parámetro Optical_Depth_Land_And_Ocean que corresponde a imágenes de AOD.

Segundo: En la opción Geo, se aplica la información geográfica a los píxeles de la región de interés, debido a que las imágenes hdf no vienen georreferenciadas, es decir no tienen corrección geométrica.

Tercero: En la opción Mosaic, se aplica el mosaico, que consiste en el ensamblaje de dos o más escenas que cubra toda el área de la región de Ayacucho para trabajar con una sola imagen.

Cuarto: En la opción Reformat, convierte del formato hdf al formato geoTIFF, debido que las imágenes en este formato son más fáciles de manejar en varios programas.

Quinto: En la opción Reproject, se reprojeta el tamaño de los píxeles en grados decimales, donde 0.02678571° equivale a 3 km.

Finalmente, se ordena el pedido de las imágenes y se procedió la descarga con la extensión DownThemAll (Firefox). Las imágenes diarias descargadas son imágenes georreferenciadas, en mosaico y en formato geoTIFF. En la Figura 5.2, se muestra una imagen del día 18 de mayo de 2017 y sus especificaciones se muestra en la Figura 5.3.

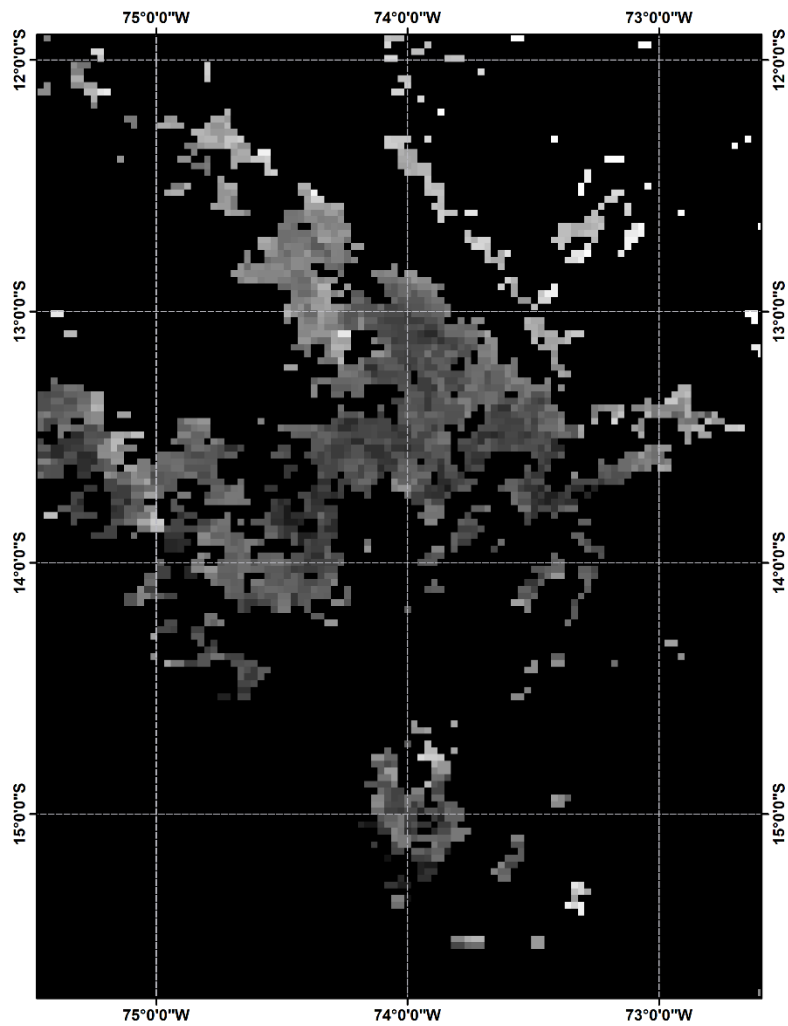


Figura 5.2. Imagen de MYD04_3K del día jueves, 18 de mayo de 2017.

Comportamiento:		
Orden de libertad		Volver a aplicar la Indicaciones
Descargar: / archive / orders / 501481200 /		
Producto (colección)	Rango de fechas	Proceso después de
MYD04_3K (61)	2003-01-01 .. 2003-12-31	GeoInfo
		• EastBound: -72.5 • Límite norte: -11,9 • Hacia el sur: -15,75 • WestBound: -75.5
		MosaicInfo
		• DoMosaico: 1
		ReformatInfo
• Formato: geotiff		
SdsInfo		
• MYD04_3K: Optical_Depth_Land_And_Ocean		
ReprojectInfo		
• OutputPixelSize: 0.02678571 • Proyección: GEO • ResampleType: más cercano		

Figura 5.3. Especificaciones del procesamiento de imágenes MODIS Aqua

El total de imágenes descargados fue de 17 años (2003 al 2019) de la plataforma LAADS DAAC con un total de 12309 imágenes diarios (Tabla 5.1) correspondientes a MODIS/Terra y MODIS/Aqua, seguidamente estas imágenes serán procesadas con el programa ENVI5.3 + IDL8.5, EXEL y ArcGis para obtener datos numéricos y mapas.

Tabla 5.1

Total, de imágenes MOD04_3k y MYD04_3k por año

AÑO/IMAGEN	MOD04_3K	MYD04_3K	Total
2003	349	360	709
2004	361	366	727
2005	361	364	725
2006	359	365	724
2007	363	365	728
2008	359	365	724
2009	359	365	724
2010	361	365	726
2011	363	365	728
2012	358	365	723
2013	359	365	724
2014	357	365	722
2015	359	365	724
2016	352	366	718
2017	361	365	726
2018	364	365	729
2019	363	365	728
Total	6108	6201	12309

Fuente: Elaboración propia.

b) ENVI5.3+IDL8.5

Las imágenes procesadas en la plataforma LAADS DAAC y descargadas al ordenador y son almacenados por año.

Debido a que se cuenta con 12309 imágenes procesarlo manualmente es complicado y además se corre el riesgo de cometer algún error humano. Para evitar lo mencionado se utiliza el lenguaje de programación IDL8.5 para su tratamiento automático para cada año. En total se realizó cinco programas y se muestran en ANEXO 2, a continuación, se explicará la secuencia de procesos para obtener los resultados planteados en el objetivo de la tesis.

Proceso 1

El algoritmo 1: Enumera las imágenes MOD04_3k, MYD04_3k desde el día 1 hasta el día 365 días y multiplica por el factor de escala **0.001** a cada imagen para obtener valores físicos de AOD y luego es guardado en una carpeta, los tratamientos tanto para MOD04_3k y MYD04_3k se realizan por separado, utilizando el mismo programa descrito anteriormente.

Proceso 2

El algoritmo 2: A partir de las imágenes guardadas en la carpeta (proceso 1), se hace el llamado para realizar el proceso de apilado (Layer Stacks) mensualmente y asignarle el nombre correspondiente de cada mes, luego es guardado en otra carpeta.

Proceso 3

El algoritmo 3: Se hace el llamado de las imágenes guardadas de la carpeta del proceso 2 para filtrar los pixeles negativos y cambiarlo por NAN, luego promediarlo mensualmente. Las imágenes promedias mensuales son ordenadas y apiladas manualmente con el software ENVI5.3, luego son guardados en una carpeta.

Proceso 4

El algoritmo 4: Hace el llamado de las imágenes guardadas en la carpeta del proceso 3 para promediarlo y obtener una imagen del promedio anual.

Luego se repite los procesos 1, 2, 3 y 4 para los 17 años, obteniéndose 17 imágenes de promedio anuales que servirá para construir una serie de tiempo de promedio anual, luego es guardado en una carpeta.

Proceso 5

Realizando los procesos 1, 2 y 3 para cada año y obtenemos 17 apilados de promedios mensuales, estas imágenes son cargadas en el software ENVI5.3 para realizar un solo apilado de los promedios mensuales de los 17 años y luego se guarda en una carpeta. El

algoritmo 5, hace el llamado de la imagen apilado de los promedios mensuales de los 17 años para promediar todos los eneros, febreros, marzos, ..., diciembres, obteniéndose 12 imágenes. A partir de estas imágenes se construye los mapas de la distribución espacial de AOD MODIS/Terra (12 mapas) y AOD MODIS/Aqua (12 mapas).

Para obtener las series de tiempo mensuales se carga el apilado del promedio mensual de los 17 años al ENVI5.3, también el vector de la región de Ayacucho para delimitar el área de interés, luego se procede a utilizar la estadística del ENVI5.3 para obtener 204 valores numéricos de AOD correspondientes a cada mes de los 17 años, estos datos numéricos son guardados en EXCEL para su posterior análisis.

Para obtener las series de tiempo mensuales para la provincia de Huamanga se realiza el mismo proceso descrito anteriormente, en este caso se utiliza el vector de la provincia de Huamanga para delimitar el área de interés así mismo se procedió para obtener las series de tiempo mensuales para la ciudad de Ayacucho.

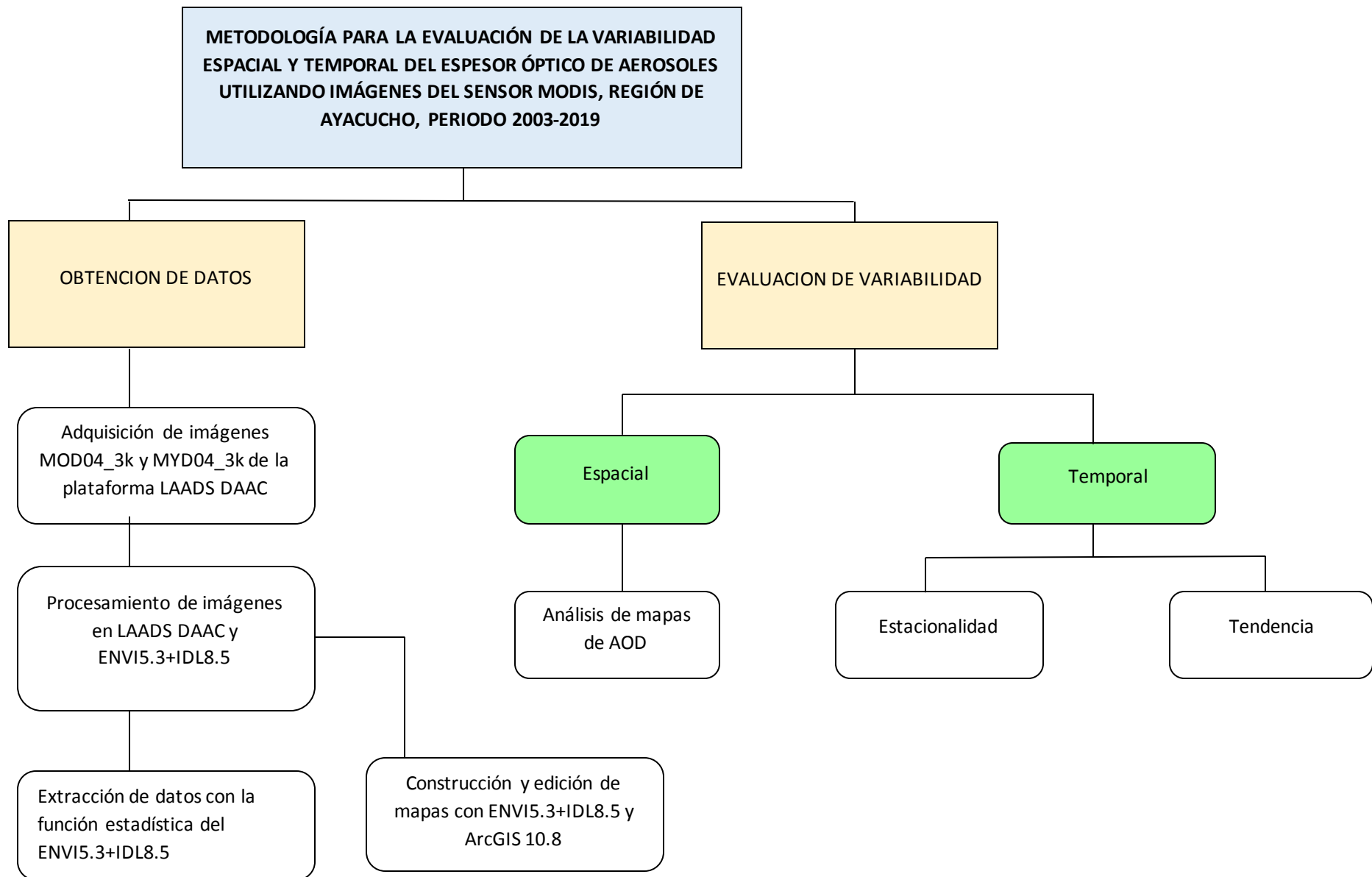


Figura 5.4. Esquema de la metodología desarrollada.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presenta y discute los resultados obtenidos de la variabilidad espacio – temporal del espesor óptico de aerosoles (AOD) utilizando imágenes del sensor MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua en la región de Ayacucho para el periodo 2003-2019.

6.1 Distribución espacial y temporal de AOD en la región de Ayacucho

En esta sección se expone y describe la distribución espacial y temporal del AOD de los satélites Terra y Aqua en la región de Ayacucho, provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho para el periodo de 2003-2019, a partir de la totalidad de las imágenes mensuales.

6.1.1 Distribución espacial total de AOD

Los valores de AOD/Aqua promedio de 17 años sobre la región de Ayacucho muestran una clara distribución espacial, cuyo valor medio está en el rango de 0.109 ($\pm$ 0.062) con valores máximos y mínimos iguales a 0.288 y 0.043, que se registraron en los meses de marzo (año 2017) y junio (año 2009) respectivamente (ver Tabla 6.1). En la Figura 6.1 se muestra que la concentración del AOD/Aqua es mayor en el noreste (NE) y con una disminución gradual hacia el suroeste (SO). De igual manera en el caso de los valores de AOD/Terra muestran una clara distribución espacial, cuyo valor medio está en el rango de 0.110 ($\pm$ 0.058) con valores máximos y mínimos iguales a 0.249 y 0.049 que se registraron en los meses de octubre (año 2007) y junio (año 2012) respectivamente (ver

Tabla 6.1), en la Figura 6.2 se muestra que la mayor concentración de AOD/Terra se encuentra en el noreste (NE) y disminuye gradualmente hacia el suroeste (SO).

En el caso de la provincia de Huamanga, los valores de AOD/Aqua promedio de 17 años muestran un claro contraste en su distribución espacial entre el noroeste (NO) y sureste (SE) de la provincia (Figura 6.1), cuyo valor medio está en el rango de $0.095 (\pm 0.038)$ con valores máximos y mínimos iguales a 0.286 y 0.039 que se registraron en los meses de marzo (año 2017) y julio (año 2011) respectivamente (ver Tabla 6.1). En el caso de los valores de AOD/Terra promedio de 17 años muestran un claro contraste en su distribución espacial entre el noroeste (NO) y sureste (SE) de la provincia de Huamanga (Figura 6.2), cuyo valor medio está en el rango de $0.094 (\pm 0.040)$ con valores máximos y mínimos iguales a 0.413 y 0.041 que se registraron en los meses de febrero (año 2013) y setiembre (año 2009) respectivamente (ver Tabla 6.1).

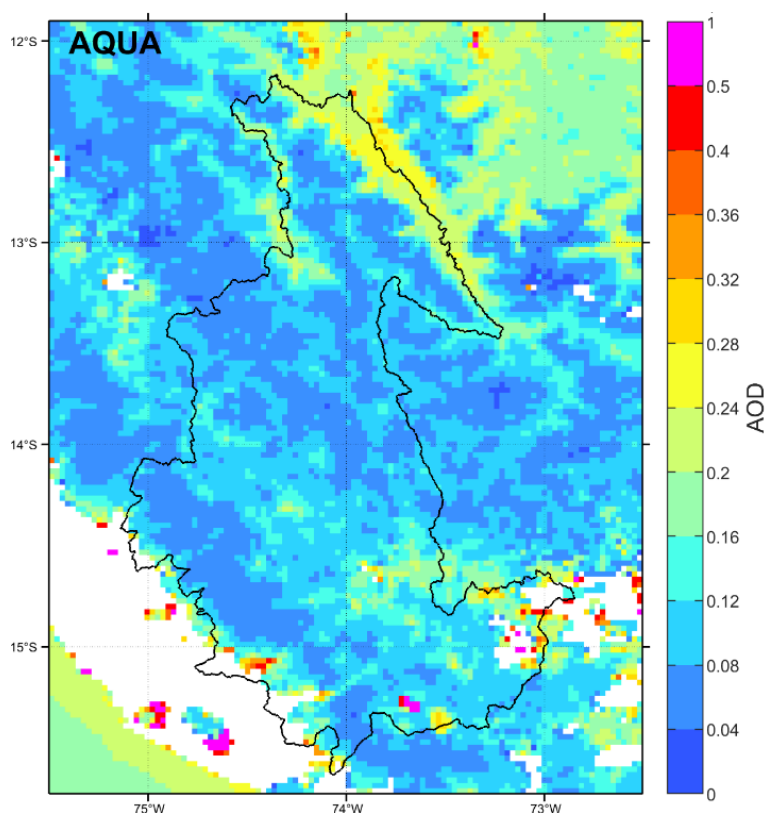


Figura 6.1. Variación espacial del promedio de AOD en la región de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite Aqua en el periodo de 2003-2019.

El valor de AOD/Aqua promedio de 17 años sobre la ciudad de Ayacucho, registra un valor medio que está en el rango de $0.154 (\pm 0.036)$ con valores máximos y mínimos iguales a 0.419 y 0.071 que se registraron en los meses de febrero (año 2014) y mayo (año 2014) respectivamente (ver Tabla 6.1). En el caso de los valores de AOD/Terra el promedio de 17 años sobre la ciudad de Ayacucho, registra un valor medio que está en el rango de $0.154 (\pm 0.037)$ con valores máximos y mínimos iguales a 0.249 y 0.049 que se registraron en los meses de octubre (año 2007) y julio (año 2012) respectivamente (ver Tabla 6.1).

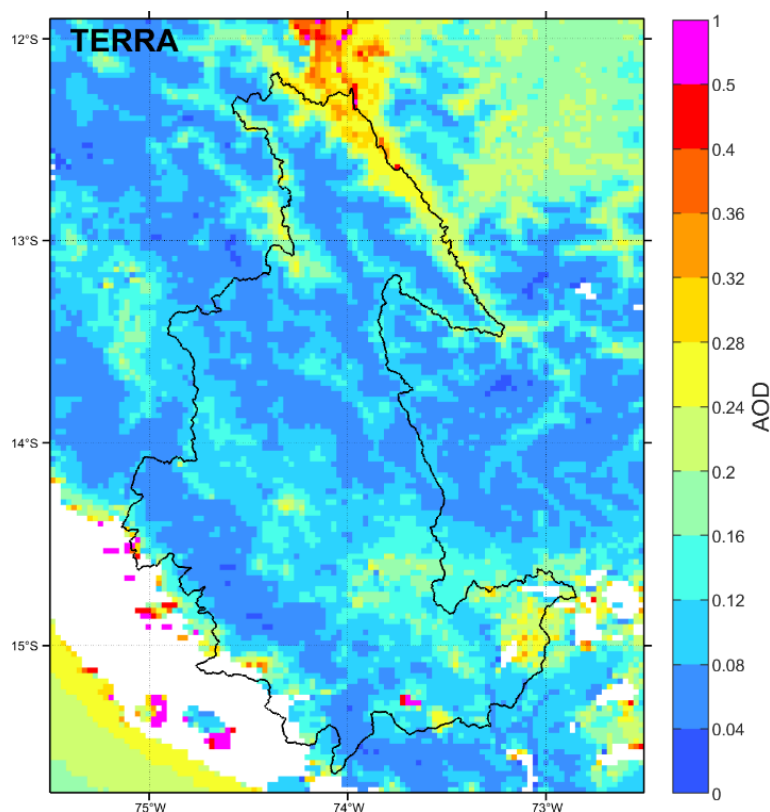


Figura 6.2. Variación espacial del promedio de AOD en la región de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite Terra en el periodo de 2003-2019.

Tabla 6.1

Valores medios de AOD en la región de Ayacucho, provincia Huamanga y ciudad de Ayacucho observada por MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua en el periodo 2003-2019.

Aqua	Región de Ayacucho		Provincia de Huamanga		Ciudad de Ayacucho	
	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha
Máximo	0.288	2017/03	0.286	2017/03	0.419	2014/02
Mínimo	0.043	2009/06	0.039	2011/07	0.071	2014/05
Promedio ± Desviación estándar	0.109 ± 0.062		0.095 ± 0.038		0.154 ± 0.036	
Terra	Región de Ayacucho		Provincia de Huamanga		Ciudad de Ayacucho	
	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha
Máximo	0.249	2007/10	0.413	2013/02	0.249	2007/10
Mínimo	0.049	2012/06	0.041	2009/07	0.049	2012/06
Promedio ± Desviación estándar	0.110 ± 0.058		0.094 ± 0.040		0.154 ± 0.037	

Fuente: datos alcanzados en el estudio.

6.1.2 Variabilidad temporal total de AOD

En la distribución temporal de los promedios mensuales por año de AOD para el periodo de 2003-2019, se observa la evolución temporal de los valores de AOD en la región de Ayacucho, provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho (ver Figura 6.3).

En el primer caso, la región de Ayacucho (Figura 6.3a), se aprecia que la variabilidad temporal de AOD revela un comportamiento cíclico tanto para MODIS/Terra y MODIS/Aqua, también se aprecia que los valores mínimos de AOD de MODIS/Terra se asocian a los mínimos de AOD de MODIS/Aqua, pero no en los máximos. En el segundo caso de la provincia Huamanga (Figura 6.3b) se aprecia que la variabilidad de AOD revela un comportamiento cíclico tanto para MODIS Terra y Aqua, también se aprecia que los valores mínimos de AOD de MODIS/Terra se asocian a los mínimos de AOD de MODIS/Aqua, pero no en los máximos. En el tercer caso de la ciudad de Ayacucho (Figura 6.3c) se aprecia que la variabilidad de AOD es un tanto cíclico tanto para MODIS

Terra y Aqua, también se aprecia que los valores mínimos de AOD de MODIS/Terra se asocian a los mínimos de AOD de MODIS/Aqua, pero no en los máximos.

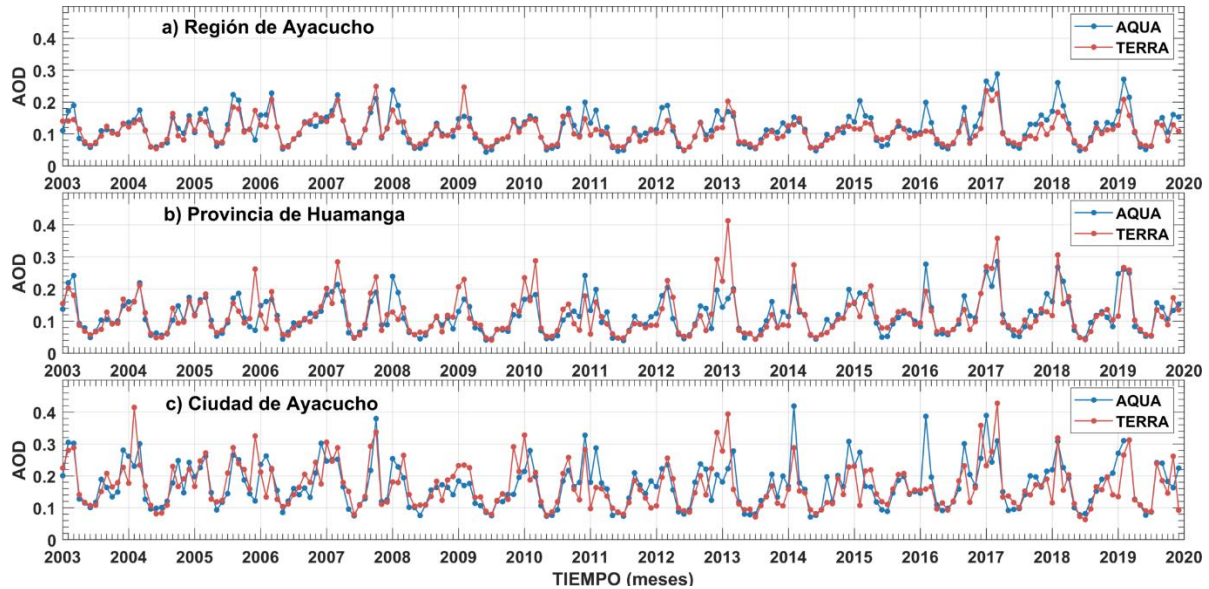


Figura 6.3. Variación del promedio mensual AOD de la a) región de Ayacucho, b) provincia Huamanga y c) ciudad de Ayacucho observada por MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua en el periodo 2003-2019.

6.1.3 Variabilidad anual de AOD

La distribución espacial promedio de AOD en la región de Ayacucho correspondiente a los doce meses del año, se obtiene utilizando las imágenes mensuales en el periodo de 2003-2019 a partir del valor medio de todas las imágenes de enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre, noviembre y diciembre en el periodo de estudio.

6.1.3.1 Variabilidad espacial del ciclo anual de AOD

La distribución espacial promedio del ciclo anual de AOD, región de Ayacucho, se muestra en la Fig.6.4 y Fig.6.5 para Aqua y Terra respectivamente. El área de bajo valor

de AOD está en la parte sur de la región de estudio. Las áreas de alto valor ocupan el noreste (NE) en los meses de agosto, septiembre y octubre, en estos 12 mapas se observa una concentración de valores altos en la parte selva de la región Ayacucho (Pichiwillca, Palmapampa, Santa rosa, Ayna San Francisco, etc.). En estos lugares la tala y quemado de árboles es imparable para convertirlo en terrenos destinados a la plantación de coca, que es la fuente económica principal de VRAEM. Las áreas blancas de las imágenes son valores nulos.

Se encuentra que a partir de los datos de AOD de Aqua/Terra para la región de Ayacucho (ver Tabla 6.2) presentan valores máximos/mínimos en los meses de febrero (0.192 ± 0.083 / 0.152 ± 0.071) y junio (0.057 ± 0.034 / 0.066 ± 0.041), también se detectaron que los valores de AOD máximos/mínimos para la provincia de Huamanga se registraron en los meses de febrero (0.196 ± 0.071 / 0.142 ± 0.062) y junio (0.051 ± 0.024 / 0.057 ± 0.024), y en la ciudad de Ayacucho se presentan los máximos/ mínimos de AOD/Aqua en los meses de febrero (0.271 ± 0.078) y junio (0.090 ± 0.027) y para los datos de AOD /Terra se dan en los meses de Marzo (0.213 ± 0.054) y junio (0.097 ± 0.022).

Tabla 6.2.

Promedio mensual y desviación estándar de AOD/A: Aqua y AOD/T: Terra en la región de Ayacucho, provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho para el período 2003-2019.

		Región de Ayacucho	Provincia de Huamanga	Ciudad de Ayacucho
Enero	A	0.137 ± 0.065	0.140 ± 0.064	0.213 ± 0.068
	T	0.128 ± 0.059	0.119 ± 0.050	0.183 ± 0.059
Febrero	A	0.192 ± 0.083	0.196 ± 0.071	0.271 ± 0.078
	T	0.152 ± 0.071	0.142 ± 0.062	0.206 ± 0.057
Marzo	A	0.164 ± 0.077	0.163 ± 0.055	0.226 ± 0.052
	T	0.152 ± 0.061	0.151 ± 0.055	0.213 ± 0.054
Abril	A	0.108 ± 0.049	0.095 ± 0.034	0.138 ± 0.035
	T	0.107 ± 0.047	0.099 ± 0.036	0.143 ± 0.029
Mayo	A	0.066 ± 0.032	0.061 ± 0.023	0.094 ± 0.023
	T	0.074 ± 0.035	0.071 ± 0.027	0.113 ± 0.025
Junio	A	0.057 ± 0.034	0.051 ± 0.024	0.090 ± 0.027
	T	0.066 ± 0.041	0.057 ± 0.024	0.097 ± 0.022
Julio	A	0.068 ± 0.051	0.058 ± 0.028	0.103 ± 0.028
	T	0.073 ± 0.045	0.062 ± 0.027	0.105 ± 0.027
Agosto	A	0.105 ± 0.076	0.092 ± 0.044	0.165 ± 0.044
	T	0.106 ± 0.088	0.090 ± 0.041	0.156 ± 0.040
Setiembre	A	0.134 ± 0.105	0.117 ± 0.054	0.191 ± 0.052
	T	0.128 ± 0.107	0.109 ± 0.057	0.194 ± 0.054
Octubre	A	0.116 ± 0.088	0.108 ± 0.063	0.186 ± 0.086
	T	0.111 ± 0.099	0.098 ± 0.053	0.177 ± 0.052
Noviembre	A	0.119 ± 0.132	0.100 ± 0.042	0.153 ± 0.051
	T	0.110 ± 0.090	0.099 ± 0.051	0.168 ± 0.050
Diciembre	A	0.131 ± 0.117	0.118 ± 0.064	0.204 ± 0.078
	T	0.124 ± 0.109	0.122 ± 0.048	0.175 ± 0.053

Fuente: datos alcanzados en el estudio

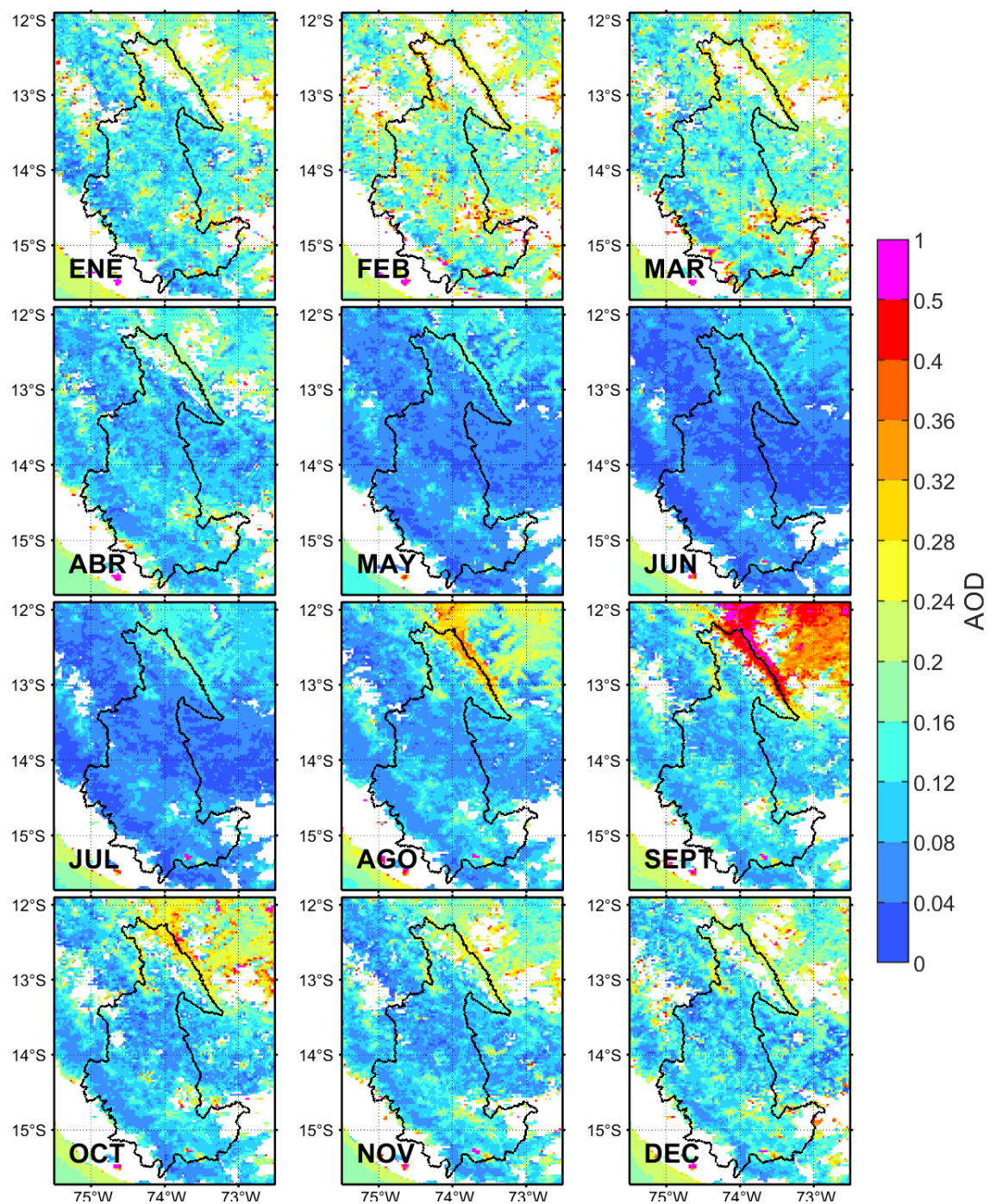


Figura 6.4. Ciclo anual de AOD MODIS/Aqua para la región de Ayacucho en el periodo 2003-2019.

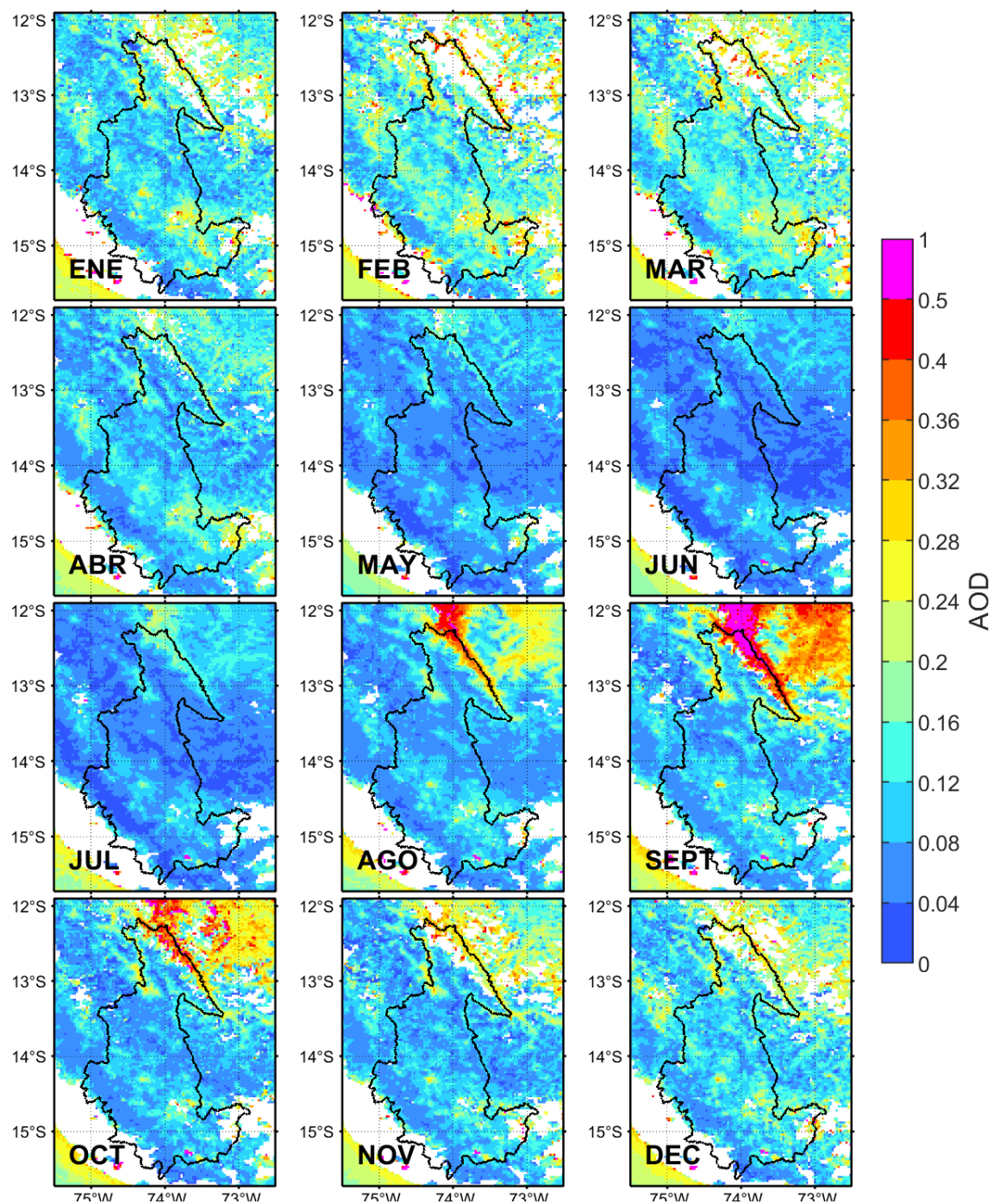


Figura 6.5. Ciclo anual de AOD MODIS/Terra para la región de Ayacucho en el periodo 2003-2019.

6.1.3.2 Variación temporal del ciclo anual de AOD

En la figura 6.6 se observa la distribución temporal de los valores medios o normales de AOD por meses del año para el periodo (2003-2019) tanto para MODIS Terra y Aqua, en

el caso de la región de Ayacucho (Figura 6.6a) ambas series temporales presentan la misma dinámica, que es decreciente a partir del mes de febrero hasta el mínimo de junio llegando a tener un comportamiento creciente en los meses siguientes hasta diciembre y de esa manera este ciclo se repetiría en cada año de estudio. En el caso de la provincia de Huamanga (Figura 6.6b) y la ciudad de Ayacucho (Figura 6.6c) presentan la misma dinámica en su ciclo anual que en la región de Ayacucho.

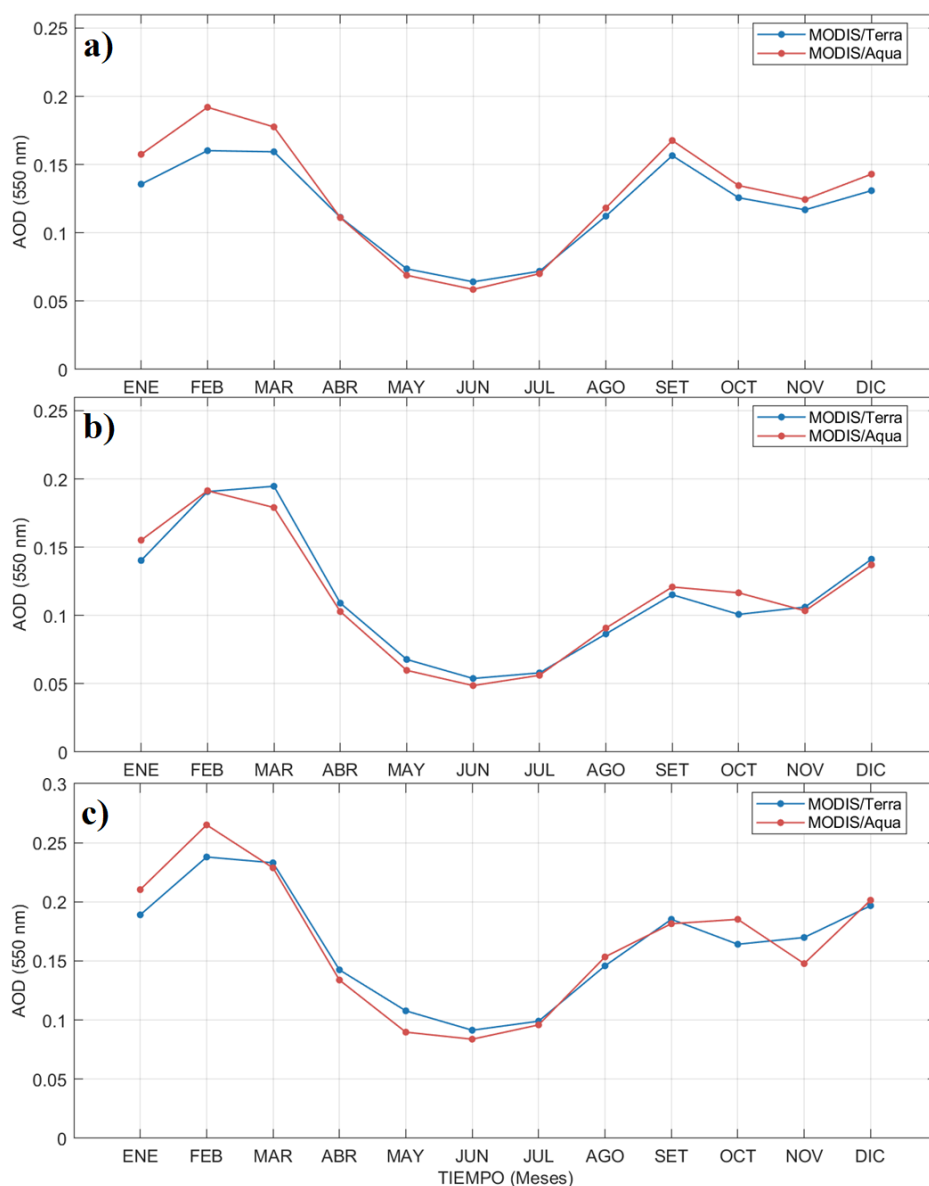


Figura 6.6. Variación del AOD de los promedios por meses de 17 años de la a) región Ayacucho, b) provincia Huamanga y c) ciudad de Ayacucho observada por MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua en el periodo 2003-2019.

6.1.4 Variabilidad estacionalidad de AOD

En este apartado se describe el comportamiento estacional del parámetro AOD de los satélites Aqua y Terra, en las cuales se muestra el comportamiento espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles, en la región de Ayacucho, provincia Huamanga y la ciudad de Ayacucho, donde se obtiene los valores medios a partir del promedio de las imágenes mensuales comprendidas en cada una de las cuatro estaciones del año como verano (diciembre-enero-febrero), otoño (marzo-abril-mayo), invierno (junio-julio-agosto) y primavera (setiembre-octubre-noviembre) en el periodo de 2003-2019.

6.1.4.1 Variabilidad espacial de la estacionalidad de AOD

La distribución espacial estacional promedio de MODIS AOD en toda la región de Ayacucho en el período 2003-2019 se muestra en la Figura 6.8 y Figura 6.9 con sus valores estadísticos en las Tablas 6.3 y 6.4. Se observaron valores medios estacionales altos y bajos de AOD prácticamente en todas las áreas de estudio, en las temporadas de verano e invierno. No se encontraron diferencias significativas en la dinámica estacional de los valores de AOD en las tres áreas de estudio (ver Tabla 6.3 y 6.4), los datos revelan que sobre las tres áreas de estudio los valores medios máximos y mínimos de AOD de Aqua y Terra se registraron en verano e invierno, se encuentra que, sobre la ciudad de Ayacucho, los valores medios de AOD son significativamente más elevados que los obtenidos de las otras áreas.

La ubicación de los centros con alta carga de aerosoles prácticamente no se modificó durante todas las estaciones, pero tuvo algunas fluctuaciones estacionales, excepto solo en la ciudad de Ayacucho, donde el predominio de aerosoles de origen natural y antropogénico con valores medios de AOD ($\pm$ desviación estándar) es prominente en verano, para los datos Aqua es 0.229 ($\pm$ 0.062) y Terra es 0.186 ($\pm$ 0.048).

En las figuras 6.7 y Figura 6.8 se muestra la información estadística relativa de la distribución estacional de AOD. Las variaciones espaciales y estacionales de la AOD sobre el dominio de estudio se estudiaron utilizando los conjuntos de datos de largo plazo MODIS/Terra (2003-2019) y MODIS/Aqua (2003-2019). Las distribuciones espaciales de AOD Terra y Aqua son similares; sin embargo, los valores de AOD Terra son más bajos que los de Aqua, lo que se puede atribuir a la hora de medición de cada satélite. La variación estacional se podría explicar a efectos meteorológicos y fuentes de emisión antropogénicas asociadas con el uso doméstico de energía, prácticas agrícolas, quema de biomasa, emisiones naturales estacionales, como polvo, y transporte de larga distancia.

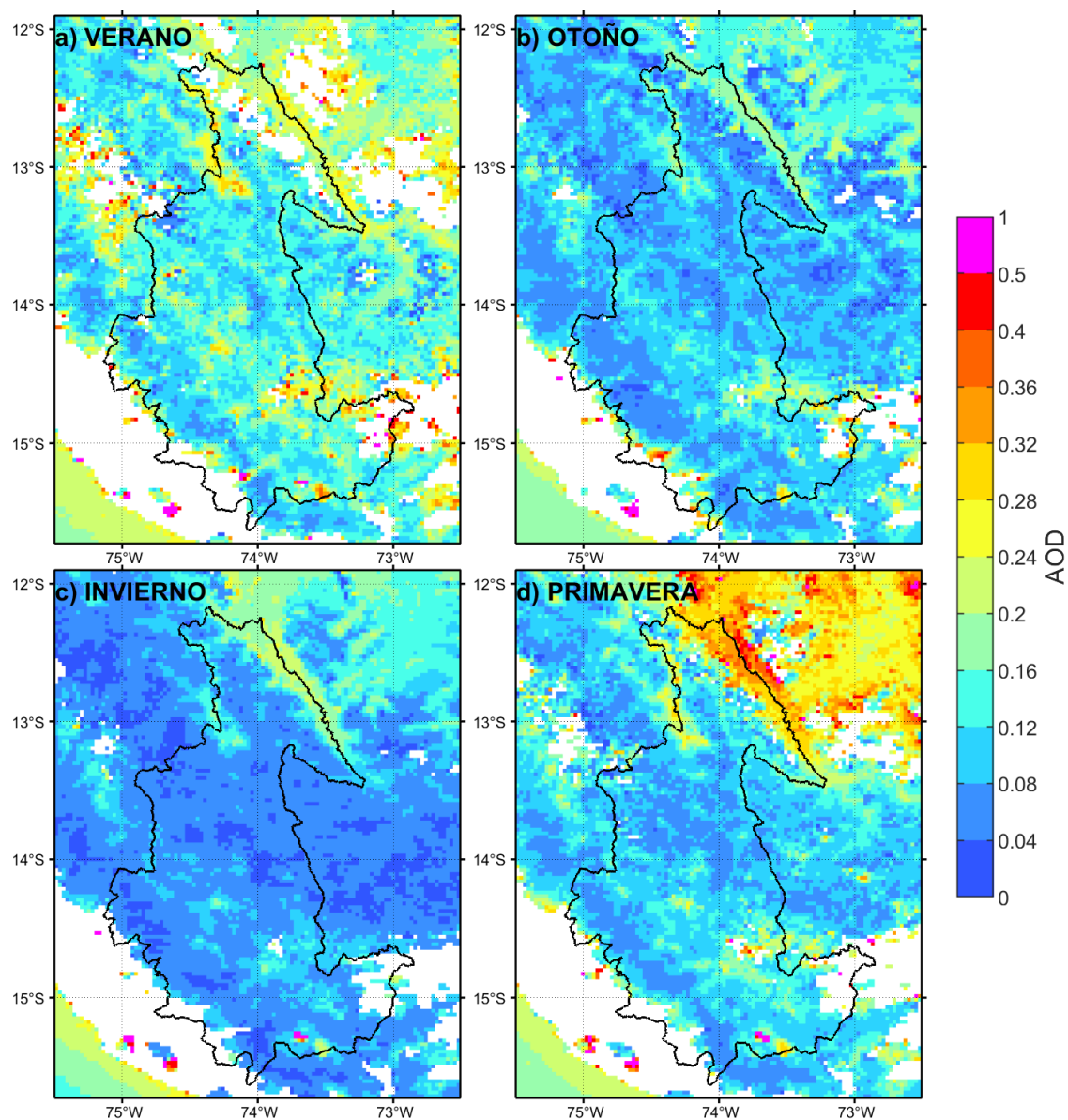


Figura 6.7. Distribuciones espaciales estacionales de AOD promediadas durante 17 años (2003-2019) extraídas de MODIS/Aqua en la región de Ayacucho. Los espacios en blanco en la figura son áreas para las que no hay datos disponibles.

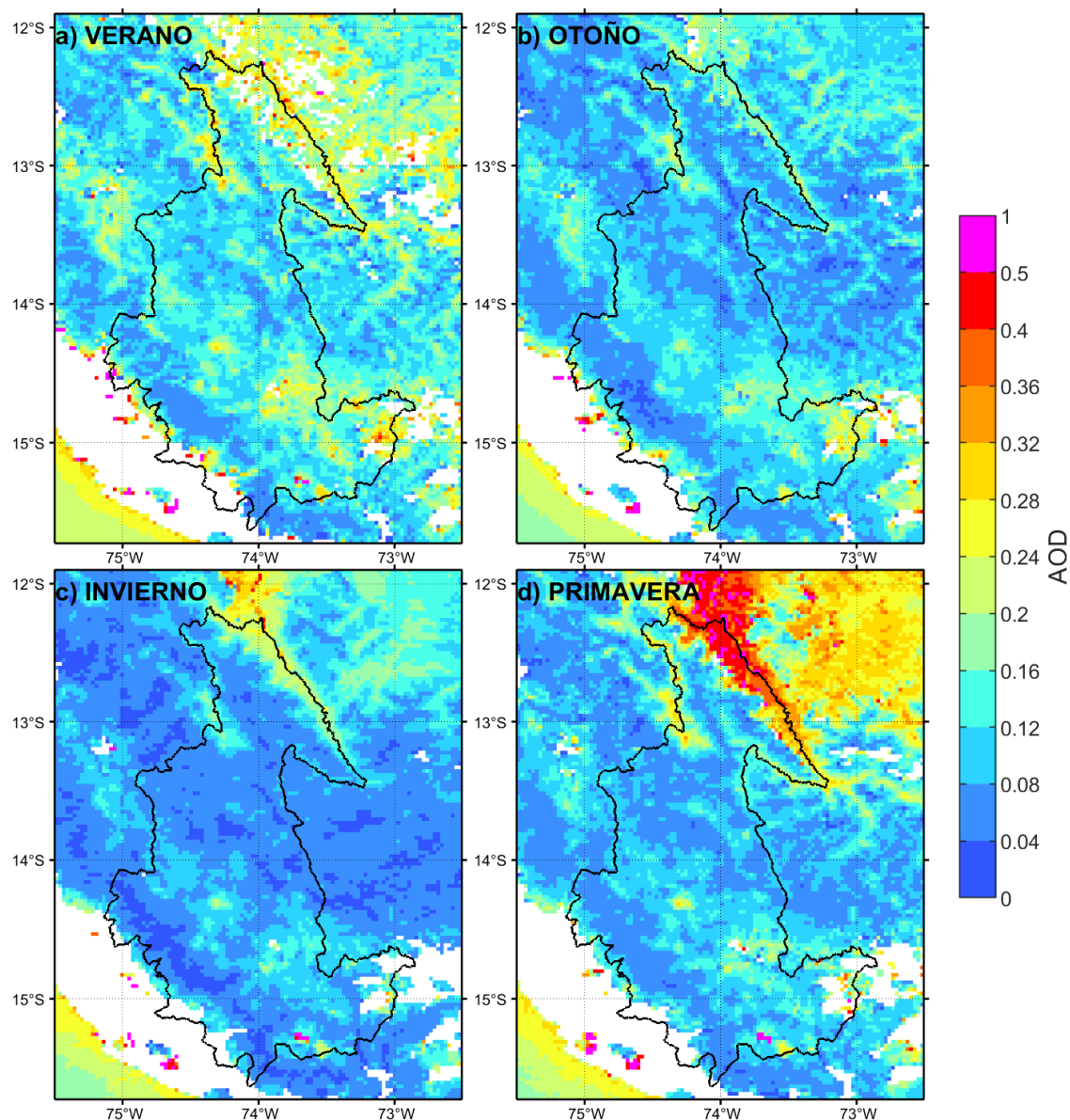


Figura 6.8. Distribuciones espaciales estacionales de AOD promediadas durante 17 años (2003-2019) extraídas de MODIS/Terra en la región de Ayacucho. Los espacios en blanco en la figura son áreas para las que no hay datos disponibles.

6.1.4.2 Variabilidad temporal de la estacionalidad de AOD

En este apartado se describirá el comportamiento anual de AOD MODIS Terra y Aqua por estaciones, en el periodo 2003-2019, se muestran 16 series de tiempo anuales para cada estación del año (ver Figura 6.9, 6.10 y 6.11), en las cuales se observa el comportamiento temporal del espesor óptico de los aerosoles, en la región de Ayacucho, provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho. Con el fin de determinar la tendencia de cada una de las áreas de estudio con los datos de MODIS Terra y Aqua, se realizó el análisis de tendencia lineal de largo plazo con base en el valor de AOD promedio anual y estacional por área de estudio utilizando la regresión lineal. Las Figuras 6.9, 6.10 y 6.11 muestran los valores medios anuales y estacionales de AOD para el período de 2003 a 2019 para toda la región de Ayacucho, provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho. En general, la serie temporal promedio anual de AOD (Aqua) mostró una tendencia a aumentar en las estaciones de verano y otoño para la región de Ayacucho, provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho (ver Tabla 6.3) nótese que en invierno y primavera se observa una reducción de valores por año con tendencias negativas para las tres áreas de estudio.

Los valores de AOD (Aqua/ Terra) en la región de Ayacucho, en las estaciones de verano y otoño durante el monitoreo de 17 años, muestran una forma lineal sin picos con un aumento gradual de los valores de AOD, en el caso de invierno y primavera si presentan picos en el año 2005 y 2007. Los valores de AOD (Aqua/ Terra) en la provincia de Huamanga, para las estaciones de verano, otoño, invierno y primavera durante el monitoreo de 17 años muestran una forma lineal sin picos con un aumento gradual de los valores de AOD, solo diferenciando para verano AOD (Terra) que presenta un pico en el año 2013. Los valores de AOD (Aqua) de la ciudad de Ayacucho de otoño, invierno y primavera durante el monitoreo de 17 años muestra una forma lineal sin picos distintos

con un aumento gradual de los valores de AOD. En verano, a diferencia del caso de otras estaciones, se observa un ciclo sinusoidal para Terra y Aqua.

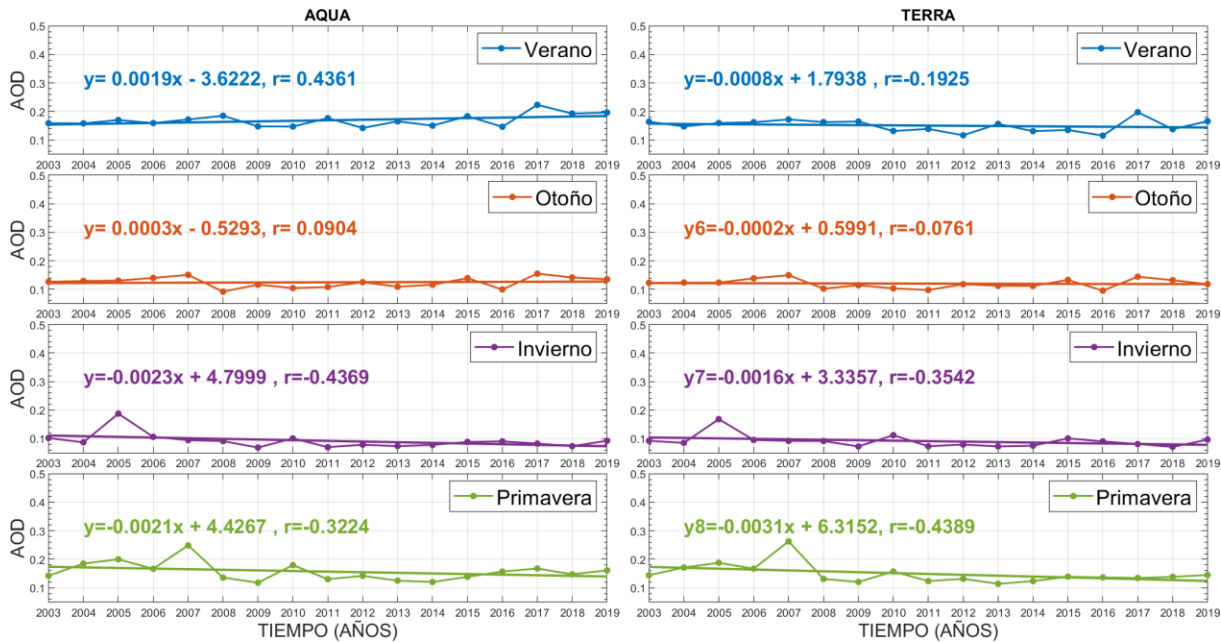


Figura 6.9. Series de tiempo estacional de AOD (Aqua/Terra) promediadas para el período 2003-2019 para la región de Ayacucho, junto con las pendientes y el coeficiente de correlación (r) de la tendencia lineal.

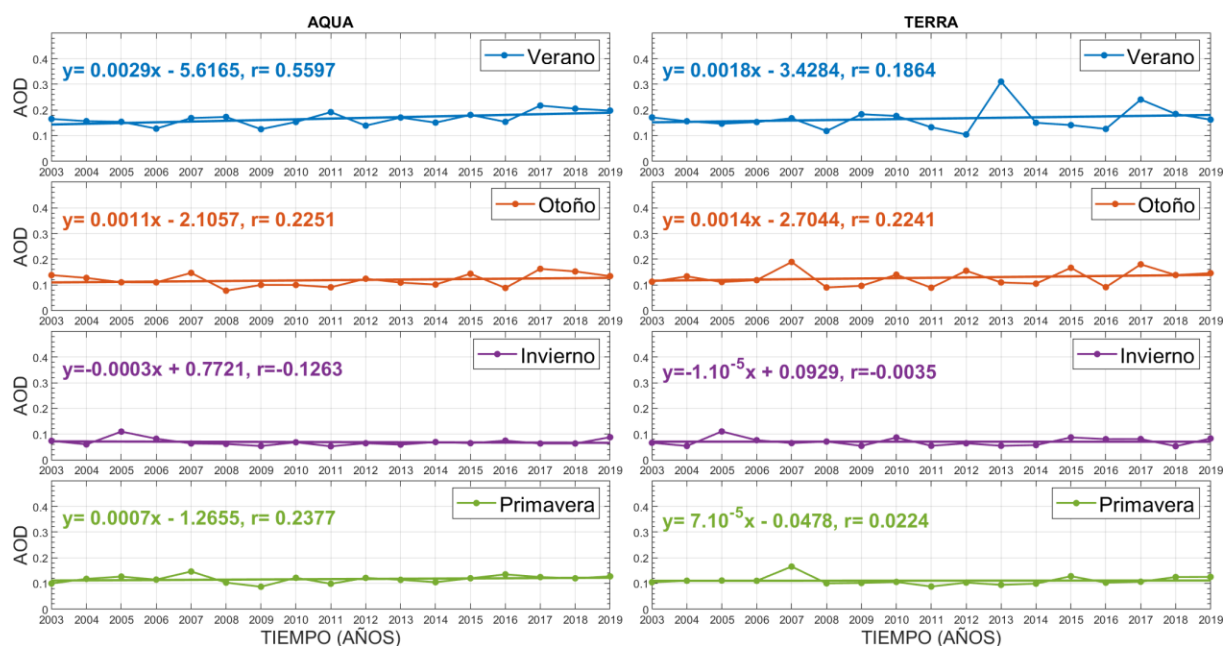


Figura 6.10. Series de tiempo estacional de AOD (Aqua/Terra) promediadas para el período 2003-2019 para la provincia de Huamanga, junto con las pendientes y el coeficiente de correlación (r) de la tendencia lineal.

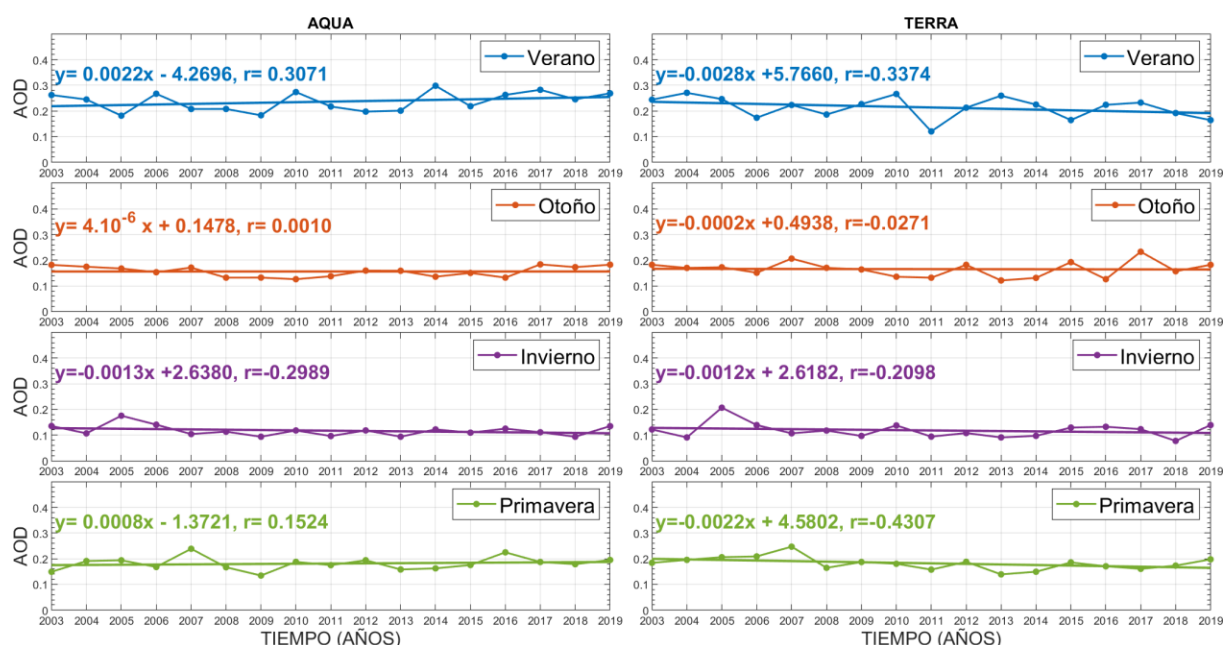


Figura 6.11. Series de tiempo estacional de AOD (Aqua/Terra) promediadas para el período 2003-2019 para la ciudad de Ayacucho, junto con las pendientes y el coeficiente de correlación (r) de la tendencia lineal.

Tabla 6.3.

Promedio estacional y desviación estándar de AOD (Aqua) junto con las pendientes y el coeficiente de correlación (r) de las tres áreas de estudio, promediadas para el período 2003-2019 (nivel de confianza 95%)

Aqua				
Región de Ayacucho				
	Promedio	Desviación estándar	Tendencia (AOD/año)	r (correlación)
Verano	0.162	± 0.071	0.0019	0.4361
Otoño	0.109	± 0.055	0.0003	0.0904
Invierno	0.086	± 0.056	-0.0023	-0.4369
Primavera	0.153	± 0.097	-0.0021	-0.3224
Provincia de Huamanga				
Verano	0.142	± 0.059	0.0029	0.5597
Otoño	0.093	± 0.031	0.0011	0.2251
Invierno	0.067	± 0.031	-0.0003	-0.1263
Primavera	0.110	± 0.048	0.0007	0.2377
Ciudad de Ayacucho				
Verano	0.229	± 0.062	0.0022	0.3071
Otoño	0.137	± 0.029	0.000004	0.0010
Invierno	0.119	± 0.031	-0.0013	-0.2989
Primavera	0.180	± 0.052	0.0008	0.1524

Fuente: datos alcanzados en el estudio.

Tabla 6.4

Promedio estacional y desviación estándar de AOD (Terra) junto con las pendientes y el coeficiente de correlación (r) de las tres áreas de estudio, promediadas para el período 2003-2019 (nivel de confianza 95%).

Terra				
Región de Ayacucho				
	Promedio	Desviación estándar	Tendencia (AOD/año)	r (correlación)
Verano	0.147	± 0.068	-0.0008	-0.1925
Otoño	0.110	± 0.054	-0.0002	-0.0761
Invierno	0.091	± 0.061	-0.0016	-0.3542
Primavera	0.147	± 0.105	-0.0031	-0.4389
Provincia de Huamanga				
Verano	0.126	± 0.046	0.0018	0.1864
Otoño	0.095	± 0.036	0.0014	0.2241
Invierno	0.070	± 0.030	-0.000011	-0.0035
Primavera	0.102	± 0.052	0.00007	0.0224
Ciudad de Ayacucho				
Verano	0.186	± 0.048	-0.0028	-0.3374
Otoño	0.145	± 0.031	-0.0002	-0.0271
Invierno	0.119	± 0.029	-0.0012	-0.2098
Primavera	0.181	± 0.052	-0.0022	-0.4307

Fuente: datos alcanzados en el estudio.

6.1.5 Variabilidad interanual de AOD

A continuación, se presenta la distribución espacial y temporal del parámetro AOD de MODIS Terra y Aqua en distintos años, en la región de Ayacucho, provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho, donde se expondrá y registrará estos valores medios anuales, que se obtienen promediando las imágenes mensuales correspondientes a cada año en el periodo de 2003-2019.

6.1.5.1 Variabilidad espacial interanual de AOD

En la distribución espacial de AOD (Aqua y Terra) en diferentes años, podemos observar que el AOD en la región de Ayacucho mantuvo valores uniformes en los años de 2008 a 2019 y muestra valores altos de AOD en la parte noreste de la región para los años 2004, 2005, 2007 y 2010 provenientes de Cuzco y Junín (Figura 6.12 y 6.13). De manera general el AOD alrededor de la región mantiene valores uniformes excluyendo las concentraciones anómalas en la parte noreste. La alta contribución de AOD en la parte noreste es causada posiblemente por una anomalía en las precipitaciones o una quema selectiva. En el caso de la ciudad de Ayacucho vemos que la distribución de AOD (Aqua y Terra) en todos los años no ha cambiado y se mantiene constante.

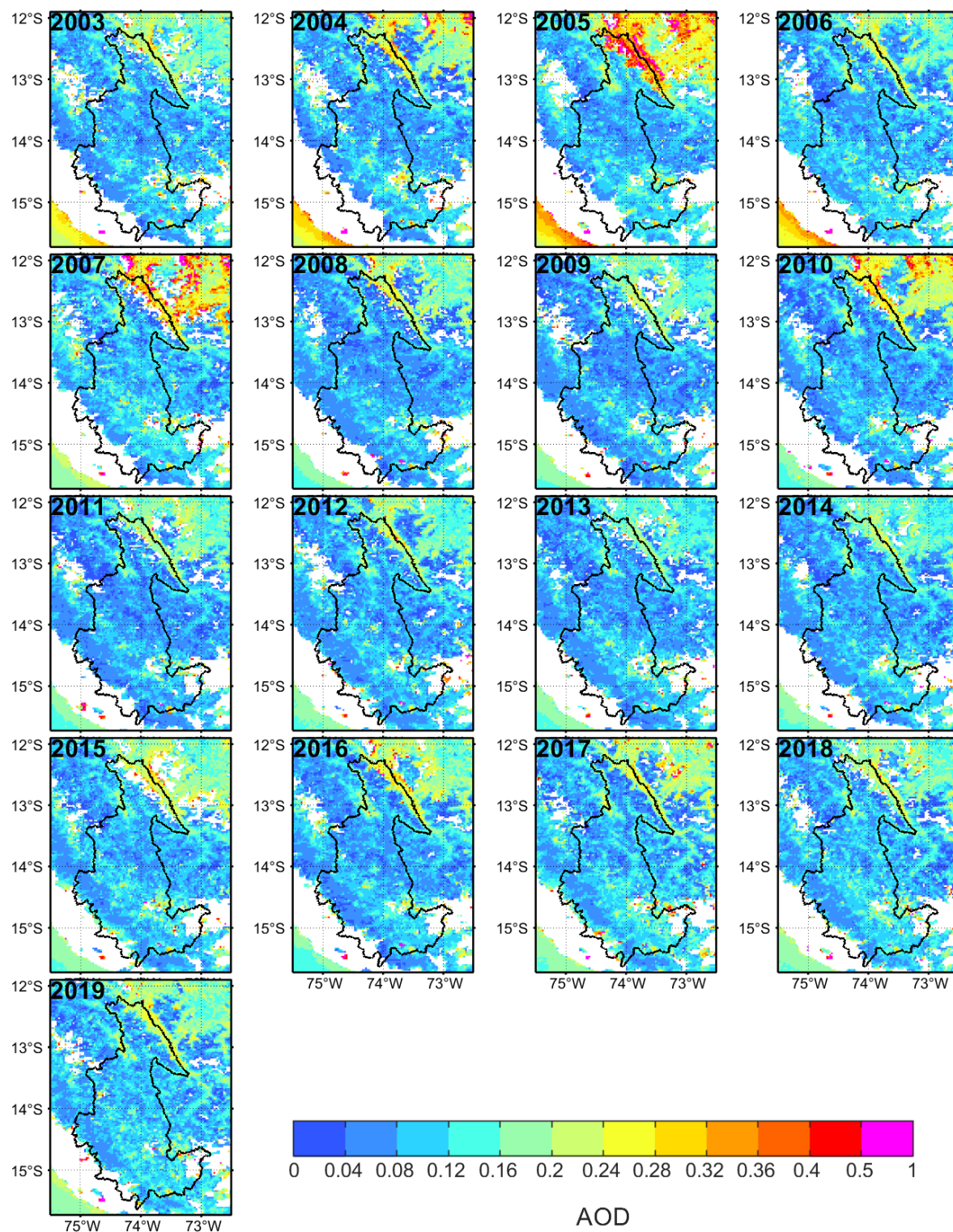


Figura 6.12. Distribuciones espaciales anuales de AOD en la región de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite Aqua, periodo 2003-2019.

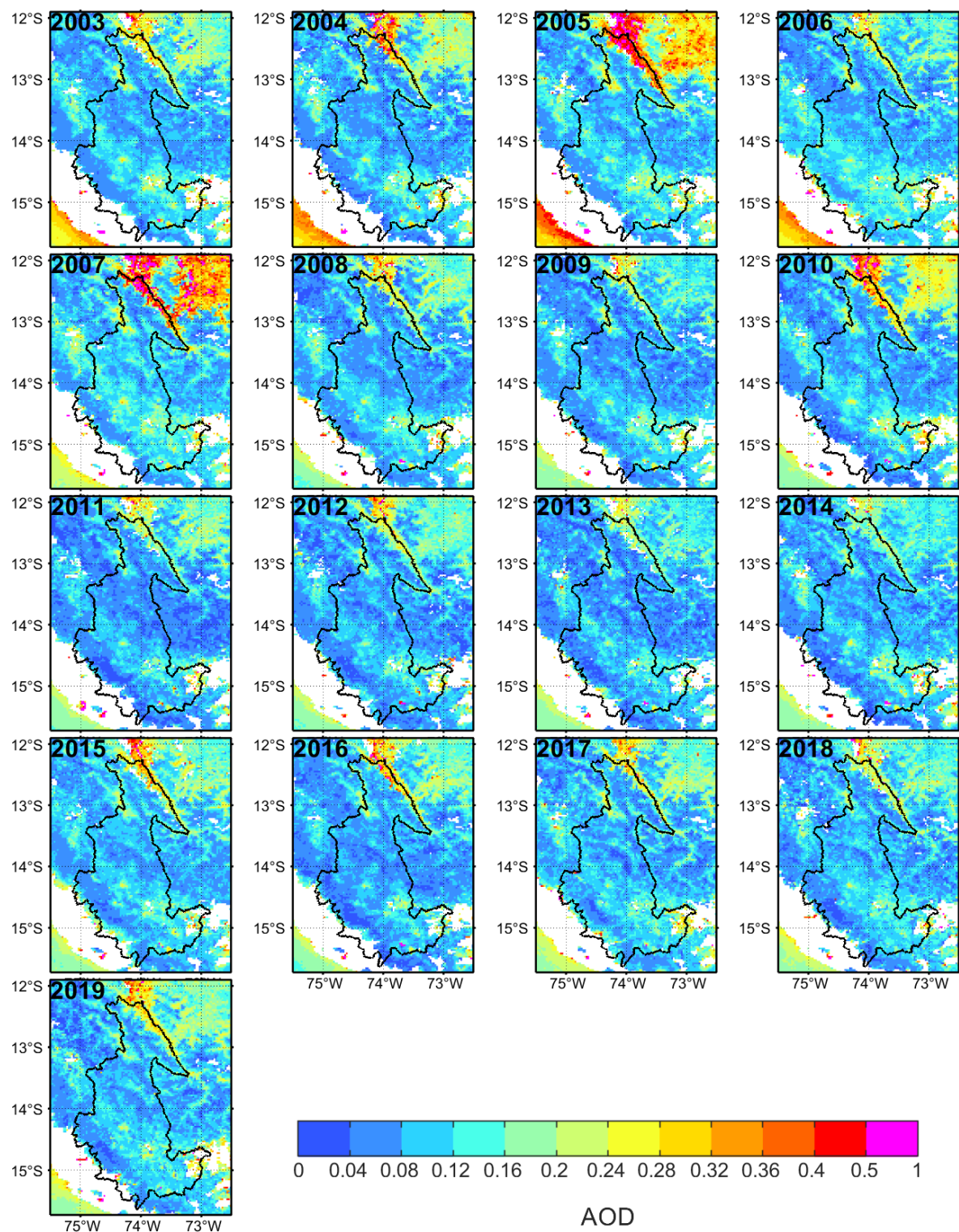


figura 6.13. Distribuciones espaciales anuales de AOD en la región de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite Terra, periodo 2003-2019.

6.1.5.2 Variabilidad temporal interanual de AOD

Las series de tiempo de la variabilidad interanual de los valores promedio de MODIS (Aqua/Terra) para las 3 áreas de estudio en el período 2003-2019 se muestran en la Figura 6.14. La regresión lineal de los valores anuales de AOD (Aqua/Terra) se representa como una línea continua para cada una de las áreas estudiadas. Se desprende del gráfico (ver Figura 6.14) que para AOD (Aqua) en la región de Ayacucho (0,0007 AOD por año), la provincia de Huamanga (0,0011 AOD por año) y la ciudad de Ayacucho (0,0004 AOD por año) hay una tendencia al aumento gradual de la concentración de aerosoles para estas áreas. Los valores interanuales más altos de AOD de Aqua y Terra (ver Tabla 6.6 y 6.7) se registraron en la ciudad de Ayacucho 0.176 (± 0.035) y 0.203 (± 0.055) en el año de 2005, y los valores más bajos de AOD se presentaron en la provincia de Huamanga en el año de 2008 con valor medio de 0.079 (± 0.039) y 2011 con valor medio de 0.073 (± 0.035) respectivamente.

En la región de Ayacucho (Tabla 6.7), se aprecia que el AOD (Aqua) tiene un promedio anual de 0.1178 (± 0.0132) similar al valor para AOD (Terra) de 0.1095 (± 0.0120) que presentan una tendencia a incrementar sus valores iguales 0.0007 (AOD/año) y 0.0006 (AOD/año), estas mismas características se presentan para la provincia de Huamanga y la ciudad de Ayacucho donde sus valores no son muy diferentes.

Tabla 6.5

Promedio anual y desviación estándar de AOD/Aqua de la región de Ayacucho, provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho para el período 2003-2019.

AQUA			
Año	Región de Ayacucho	Provincia de Huamanga	Ciudad de Ayacucho
2003	0.101 ± 0.059	0.096 ± 0.049	0.152 ± 0.051
2004	0.104 ± 0.064	0.088 ± 0.047	0.150 ± 0.048
2005	0.125 ± 0.095	0.102 ± 0.046	0.176 ± 0.035
2006	0.106 ± 0.081	0.095 ± 0.053	0.172 ± 0.061
2007	0.117 ± 0.104	0.095 ± 0.045	0.142 ± 0.048
2008	0.094 ± 0.101	0.079 ± 0.039	0.135 ± 0.035
2009	0.093 ± 0.082	0.079 ± 0.041	0.125 ± 0.036
2010	0.103 ± 0.088	0.089 ± 0.045	0.151 ± 0.043
2011	0.089 ± 0.059	0.080 ± 0.043	0.136 ± 0.045
2012	0.099 ± 0.062	0.095 ± 0.043	0.156 ± 0.041
2013	0.098 ± 0.096	0.086 ± 0.044	0.144 ± 0.054
2014	0.100 ± 0.090	0.094 ± 0.037	0.145 ± 0.041
2015	0.109 ± 0.061	0.101 ± 0.039	0.148 ± 0.040
2016	0.101 ± 0.089	0.098 ± 0.049	0.169 ± 0.063
2017	0.111 ± 0.061	0.101 ± 0.044	0.153 ± 0.043
2018	0.110 ± 0.056	0.105 ± 0.044	0.154 ± 0.050
2019	0.112 ± 0.057	0.105 ± 0.047	0.168 ± 0.049

Fuente: datos alcanzados en el estudio.

Tabla 6.6

Promedio anual y desviación estándar de AOD/Terra de la región de Ayacucho, provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho para el período 2003-2019.

Terra			
Año	Región de Ayacucho	Provincia de Huamanga	Ciudad de Ayacucho
2003	0.109 ± 0.059	0.094 ± 0.046	0.159 ± 0.050
2004	0.107 ± 0.068	0.091 ± 0.046	0.153 ± 0.049
2005	0.131 ± 0.095	0.110 ± 0.057	0.203 ± 0.055
2006	0.119 ± 0.076	0.090 ± 0.048	0.162 ± 0.051
2007	0.131 ± 0.086	0.115 ± 0.048	0.178 ± 0.050
2008	0.106 ± 0.084	0.087 ± 0.043	0.153 ± 0.041
2009	0.099 ± 0.051	0.082 ± 0.044	0.142 ± 0.045
2010	0.114 ± 0.110	0.096 ± 0.046	0.162 ± 0.046
2011	0.089 ± 0.052	0.073 ± 0.035	0.122 ± 0.037
2012	0.096 ± 0.054	0.090 ± 0.042	0.149 ± 0.036
2013	0.093 ± 0.075	0.077 ± 0.040	0.122 ± 0.037
2014	0.102 ± 0.107	0.088 ± 0.038	0.142 ± 0.035
2015	0.110 ± 0.058	0.111 ± 0.039	0.164 ± 0.036
2016	0.095 ± 0.071	0.091 ± 0.041	0.149 ± 0.046
2017	0.108 ± 0.058	0.104 ± 0.045	0.162 ± 0.044
2018	0.103 ± 0.052	0.096 ± 0.034	0.130 ± 0.031
2019	0.111 ± 0.059	0.098 ± 0.043	0.156 ± 0.038

Fuente: datos alcanzados en el estudio.

Tabla 6.7

Promedio anual y desviación estándar de AOD (Aqua/Terra) junto con las pendientes, el coeficiente de correlación (r) de la tendencia lineal en las áreas de estudio, promediadas para el período 2003-2019 (nivel de confianza 95%)

Aqua				
	Promedio	Desviación estándar	Tendencia (AOD/año)	r (correlación)
Región de Ayacucho	0.1178	± 0.0132	0.0007	0.2629
Provincia de Huamanga	0.1176	± 0.0130	0.0011	0.4243
Ciudad de Ayacucho	0.1727	± 0.0155	0.0004	0.1433
Terra				
Región de Ayacucho	0.1095	± 0.0120	0.0006	0.2611
Provincia de Huamanga	0.1186	± 0.0167	0.0008	0.2420
Ciudad de Ayacucho	0.1697	± 0.0194	0.0016	0.4142

Fuente: datos alcanzados en el estudio.

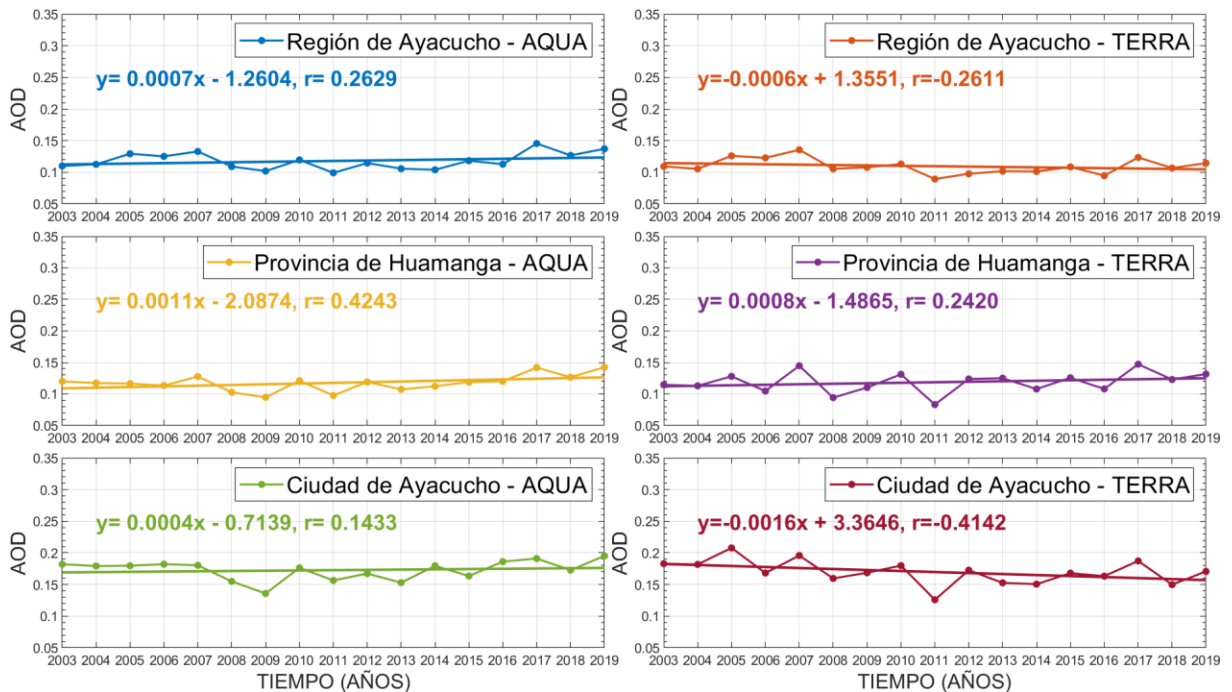


Figura 6.14. Las variaciones interanuales de la media anual de AOD, de la región de Ayacucho, provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho observada por MODIS a bordo de los satélites Aqua y Terra, periodo 2003-2019.

6.2 Correlación entre los datos de AOD satelital (MODIS) e in situ (AERONET)

Procedemos a validar los datos del AOD recuperado por el sensor MODIS (Terra y Aqua) a 3 km de resolución espacial a resolución temporal diaria (Ver Tabla A.3.2, A.3.3, A.3.4, A.3.5, A.3.6). Se usaron algunos indicadores estadísticos para evaluar las comparaciones del AOD recuperado por los satélites y el fotómetro solar instalado en tierra; es decir, el coeficiente de correlación (r), el error esperado (EE) del AOD. El coeficiente de correlación (r) es un buen indicador del acuerdo entre el AOD observado por el fotómetro solar y el AOD recuperado por satélite, en donde los valores más altos indican un mejor acuerdo.

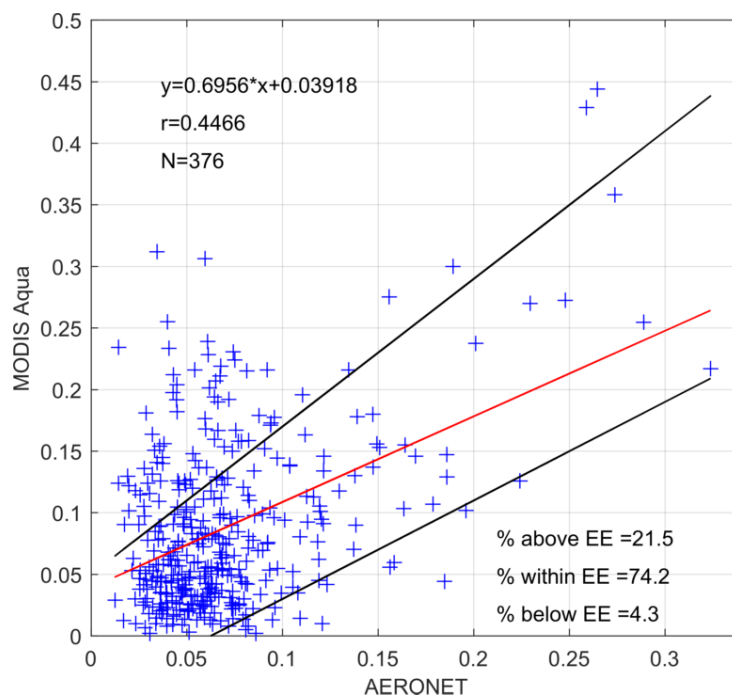


Figura 6.15. Diagrama de dispersión entre la colección observada por MODIS a bordo del satélite Aqua, periodo 2003-2019, con las correspondientes recuperaciones de AERONET. (La línea roja es la línea de regresión y las líneas negras definen la envolvente de EE).

El estudio utiliza los datos de nivel 2 de AERONET AOD para el período 2003–2019. La Figura 6.15 muestra que, de 376 pares de muestreo, el 74.2% (279 pares) de los resultados de la búsqueda están dentro del error esperado (EE) y demuestran una baja relación ($r = 0,4466$) para Aqua, en la Figura 6.16 se muestra que, de 541 pares de muestreo, el 70,8% (383 pares) de los resultados de la búsqueda están dentro del error esperado (EE) donde se muestra una baja relación de ($r = 0,3559$) para Terra con un alto grado de confiabilidad (nivel de confianza de 95%).

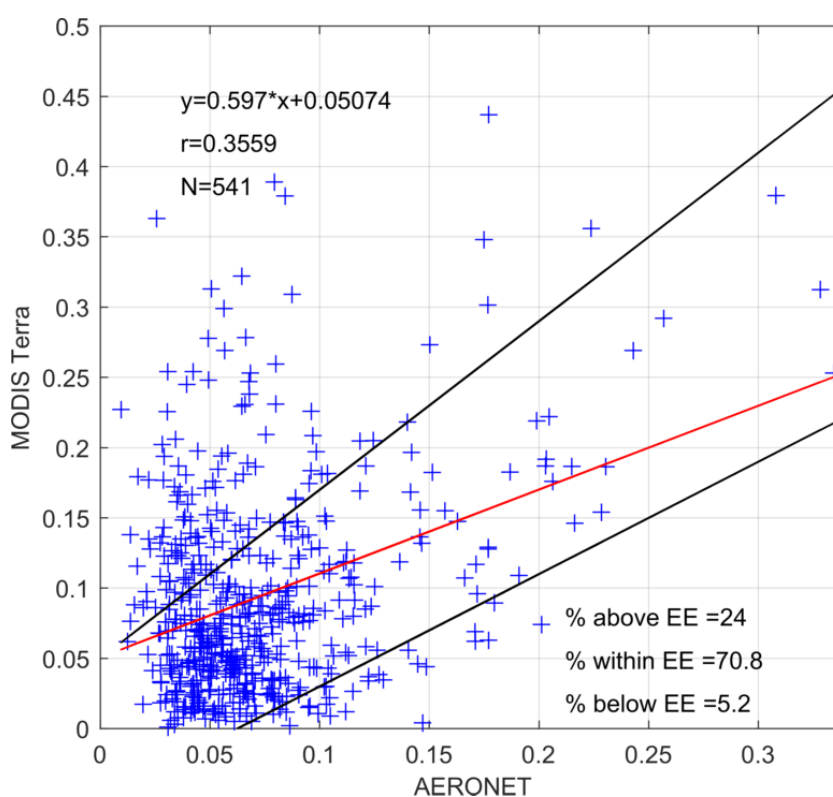


Figura 6.16. Diagrama de dispersión entre la colección observada por MODIS a bordo del satélite Terra, periodo 2003-2019, con las correspondientes recuperaciones de AERONET. (La línea roja es la línea de regresión y las líneas negras definen la envolvente de EE).

6.3 Discusión

Hasta cierto punto, el AOD muestra el nivel de contaminación del aire en una zona y posee características espacio – temporal obvias. Sin embargo, las secuencias de larga duración y la información detallada de AOD no se pueden proporcionar debido a la tecnología de monitoreo actualmente limitada. Los aerosoles por su naturaleza varían espacialmente, para observar esta variabilidad espacial al detalle se graficó distintos mapas de AOD promedio mensual, estacional y anual de 17 años de observación satelital de AOD.

En el caso de la distribución espacial total de AOD, en particular en la ciudad de Ayacucho donde existe una clara relación entre la densidad de población y la concentración de aerosoles que es denominada fuente antropogénica. Se atribuye al hecho de que el mayor porcentaje de la población de la región de Ayacucho vive en la ciudad de Ayacucho. Algunos de los valores de MODIS AOD más bajos (de 0 a 0.16) también se encontraron en regiones con baja densidad de población y la falta de actividad humana. Existe una diferencia en la concentración de aerosoles de Aqua y Terra esto en la parte norte de la región de Ayacucho (Figura 6.2) donde la imagen promedio de Terra presenta valores más altos, esto puede ser por la hora de medición que es de 1:30 pm (Aqua) y 10:30 am (Terra).

En cuanto a la variabilidad temporal total de AOD, en el primer caso la región de Ayacucho (Figura 6.3a), se aprecia que los mínimos valores de AOD de MODIS/Terra se asocian a los mínimos de AOD de MODIS/Aqua, pero no en los máximos, una de las razones podría ser la hora de medición del AOD que es de 10:30 am (MODIS/Terra) y 1:30 pm (MODIS/Aqua) entonces uno puede plantear que existe algún factor o mecanismo que condiciona la diferencia entre los valores máximos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

Según el análisis de esta investigación se concluye:

1. La metodología desarrollada cumplió con el objetivo de evaluar la variabilidad espacial y temporal del espesor óptico de aerosoles utilizando imágenes del sensor MODIS, región de Ayacucho, periodo 2003 – 2019, esta investigación es la primera documentación con la metodología planteada, en la región de Ayacucho.
2. Se logró determinar la variabilidad espacial del espesor óptico de aerosoles utilizando imágenes MOD04_3k y MYD04_3k, región de Ayacucho, periodo 2003 -2019. Los resultados (mapas de espesor óptico de aerosoles) muestran en general que las áreas de alto valor ocupan el noroeste (NE) de la región de Ayacucho, con una disminución gradual hacia el suroeste (SO), esta variación se observa con mayor intensidad en los meses de agosto, septiembre y octubre. Se observa también una concentración de valores altos en la parte selva de la región Ayacucho (Pichiwillca, Palmapampa, Santa rosa, San Francisco). En estos lugares la tala y quemado de árboles es imparable para convertirlo en terrenos destinados a la plantación de coca, que es la fuente económica principal de VRAEM.
3. Se logró determinar la variabilidad temporal del espesor óptico de aerosoles utilizando imágenes MOD04_3k y MYD04_3k, región de Ayacucho, periodo 2003 -2019. Los resultados (promedio mensual de AOD) revelan un comportamiento cíclico, que es decreciente a partir del mes de febrero hasta el mínimo de junio llegando a tener un

comportamiento creciente en los meses siguientes hasta diciembre, tanto para MODIS Terra y Aqua.

4. El AOD (Aqua) en la región de Ayacucho, la provincia de Huamanga y ciudad de Ayacucho, muestra una tendencia al aumento gradual de la concentración de aerosoles para estas áreas. Los valores interanuales más altos de AOD de Aqua y terra, se registraron en la ciudad de Ayacucho y los valores más bajos en la provincia de Huamanga.

7.2 Recomendaciones

1. Se recomienda en este tipo de investigaciones tener conocimiento del manejo de software especializado en tratamiento de imágenes satelitales. Como, por ejemplo: ENVI+IDL, Python y ArcGIS.

2. El estudio en el tema de aerosoles es todo un mundo quedando mucho por investigar, por ejemplo: investigar las causas del comportamiento cíclico del espesor óptico de aerosoles en la región de Ayacucho, Investigar el efecto de los aerosoles en la salud humana regional, Investigar el efecto de los aerosoles en el clima regional, Investigar el efecto de los aerosoles en la agricultura regional, etc.

3. Se recomienda a las autoridades de la región y la UNSCH establecer laboratorios con expertos en tema de aerosoles para la detección y monitoreo en el tiempo.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. ArcGIS Resources. (22 de 10 de 2020). Obtenido de ArcGIS Resources:
<https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm#:~:text=ArcGIS%20es%20un%20completo%20sistema,compartir%20y%20distribuir%20informaci%C3%B3n%20geogr%C3%A1fica.&text=Si%20hace%20tiempo%20que%20utiliza,permiten%20realizar>
2. CASTILLO, D. G., & EUGENIA, M. (2011). Evaluación de aerosoles troposféricos del AMCM por medio de imágenes de satélite GOES (Doctoral dissertation).
3. Chávez, J. L. (2010). Tratamiento digital de imágenes multiespectrales. Lulu.com.
4. Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de teledetección espacial, ediciones Rialp SA Madrid 2 edición.
5. DAAC, L. (19 de 10 de 2020). LAADS DAAC. Obtenido de LAADS DAAC:
https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MYD04_3K
6. Della Ceca, 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 (Master's thesis).
7. Díaz González, J. P. (1999). Propiedades radiactivas de los aerosoles atmosféricos en la región de Canarias.
8. Díaz Martínez, J. V. (2012). validación de productos MODIS (aerosoles) sobre la costa mediterránea septentrional. Universidad de Valencia.

9. INEI. (2018). Ayacucho resultados definitivos. Lima.
10. Info, P. (18 de 10 de 2014). Peru Info. Obtenido de Peru Info: http://www.peru-info.net/ayacucho_geografia_y_medio_ambiente.html#
11. Jiménez, A. M. (2006). Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS. 2ª. Grupo Editorial RA-MA.
12. Kaufman, YJ, Tanré, D. y Boucher, O. (2002). Una vista de satélite de aerosoles en el sistema climático. *Nature* , 419 (6903), 215-223.
13. Kondratyev, KY, Ivlev, LS, Krapivin, VF y Varostos, CA (2006). Propiedades de los aerosoles atmosféricos: formación, procesos e impactos . Springer Science & Business Media.
14. Lenoble, J., Remer, L. y Tanre, D. (Eds.). (2013). Detección remota de aerosoles. Springer Science & Business Media.
15. Levy, R. C. (2009). Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol over dark targets from MODIS.
16. Levy, RC, Remer, LA, Tanré, D., Mattoo, S. y Kaufman, YJ (2009). Algoritmo para la detección remota de aerosoles troposféricos sobre objetivos oscuros de MODIS: Colecciones 005 y 051: Revisión 2; Febrero de 2009. Documento de base teórica del algoritmo MODIS.
17. Liou, KN (2002). Introducción a la radiación atmosférica. Elsevier.
18. Llamas, RM, Bonifaz, R., Valdés, M., Riveros-Rosas, D. y LeyvaContreras, A. (2013). Variaciones espaciales y temporales del espesor óptico de aerosoles atmosféricos en el noroeste de México. *Geofísica Internacional*, 52 (4), 321–341. doi: 10.1016 / s0016-7169 (13) 71480-6

19. Martínez, A. R. E. (2010). Estudio de los aerosoles atmosféricos en Valencia mediante medidas del Nefelómetro de integración (Doctoral dissertation, Universitat de València).
20. Mas, J. F. (2011). Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio.
21. NASA. (21 de 10 de 2020). Atmosphere Discipline Team Imager Products. Obtenido de Atmosphere Discipline Team Imager Products: <https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/products/aerosol/algorithm-overview>
22. Otero, L. A., Ristori, P. R., 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), 355-364.
23. Ouriques, RZ (2012). ESPESSURAS ÓPTICAS DE AEROSSÓIS DE UMA REGIÃO RURAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL COMPARADAS COM UMA REGIÃO INDUSTRIAL DO BRASIL.
24. Remer, L. A., Tanre, D., Kaufman, Y. J., Levy, R., & Mattoo, S. (2006). Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS: Collection 5–Product ID: MOD04/MYD04. NASA. Disponible en: http://MODIS-atmos.gsfc.nasa.gov/_docs/MOD04-MYD04_ATBD_C005.pdf.
25. Remer, LA, Mattoo, S., Levy, RC y Munchak, LA (2013). Producto en aerosol MODIS de 3 km: algoritmo y perspectiva global. Técnicas de medición atmosférica, 6 (7), 1829-1844.
26. Represa, NS, Vázquez, JP, Porta, AA, & Sarriá, AF Estudio de la correlación mensual entre AOD obtenido de imágenes MODIS y material particulado para una ciudad costera.

27. RODRIGUEZ, E. C. (2015). Estimación del espesor óptico de los aerosoles a partir de los datos Level 1B del sensor MODIS sobre Perú (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS).
28. Rodriguez, E. C. (2016). Distribución espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles y del monóxido de carbono en el Perú relacionado con las quemadas de biomasa (2002-2014) (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS).
29. ROSÁRIO, N. M. E. (2011). Estudo da Variabilidade das Propriedades ópticas dos Aerossóis sobre a América do Sul e dos Impactos do Efeito Radiativo Direto das Partículas de Queimadas (Doctoral dissertation, Tese de Doutorado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 212 p).
30. ROSÁRIO, N. M. E. (2011). Estudo da Variabilidade das Propriedades ópticas dos Aerossóis sobre a América do Sul e dos Impactos do Efeito Radiativo Direto das Partículas de Queimadas (Doctoral dissertation, Tese de Doutorado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 212 p).
31. Shen, L., Wang, H., Zhao, T., Liu, J., Bai, Y., Kong, S. y Shu, Z. (2020). Caracterización de la contaminación regional por aerosoles en China central basada en 19 años de datos MODIS: variación espacio-temporal y discriminación del tipo de aerosol. Contaminación ambiental , 263 , 114556.
32. Sobrino, J. A. (2000). Teledetección, Servicios de publicaciones. Universidad de Valencia, 2.
33. Vargas Gargate, P. (2009). Variabilidad espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles sobre Perú usando imágenes de satélite.

34. Wei, J., Li, Z., Sun, L., Peng, Y., Liu, L., He, L., ... y Cribb, M. (2020). MODIS Collection 6.1 Producto de profundidad óptica en aerosol con resolución de 3 km: evaluación global y análisis de incertidumbre. *Ambiente atmosférico* , 240 , 117768.

ANEXOS

1. Conceptos básicos

1.1 Naturaleza de la radiación

La radiación es la propagación de energía, en una variedad de formas a través del espacio (Chávez, 2010), y su naturaleza científicamente se ha descrito desde dos teorías aparentemente contrapuestas, una determinada como un haz ondulatorio (Hyugens, Maxwell), y la otra concebida como una sucesión de unidades discretas de energía (fotones o cuantos) con masa igual a cero (Planck, Einstein), se podría decir actualmente que las dos teorías se complementan gracias a que la luz se comporta de acuerdo a ambos planteamientos (Chuvieco, 1995).

Según la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo a la velocidad de la luz, conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético, este flujo es descrito mediante dos componentes, longitud de onda (λ) y la frecuencia (ν), las cuales están relacionadas mediante la ecuación.

$$C = \lambda \nu \quad (\text{A.1.1})$$

Donde C es la velocidad de la luz ($\approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

Por otro lado, Según la teoría cuántica, la cantidad de energía de un fotón es:

$$Q = h\nu \quad (\text{A.1.2})$$

Donde, Q es la energía del fotón, ν la frecuencia y h la constante de Planck ($\approx 6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}^{-1}$). De las ecuaciones (1.1) y (1.2) se obtiene:

$$Q = h(c/\lambda) \quad (\text{A.1.3})$$

La cual muestra que a mayor longitud de onda es más difícil de detectar la información que aquella ubicada en longitudes cortas.

1.2 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es la distribución de la intensidad de radiación electromagnética, con respecto a su longitud de onda (λ) o de la frecuencia. Aunque la longitud de onda tiene un continuo de valores se establecen bandas en las cuales la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar (Chuvieco, 1995), de esta distribución en bandas las más utilizadas en teledetección son el espectro visible (0.4-0.7 μm), infrarrojo próximo (0.7-1.3 μm), infrarrojo medio (1.3-8 μm), infrarrojo lejano o térmico (8-14 μm) y Micro-ondas.

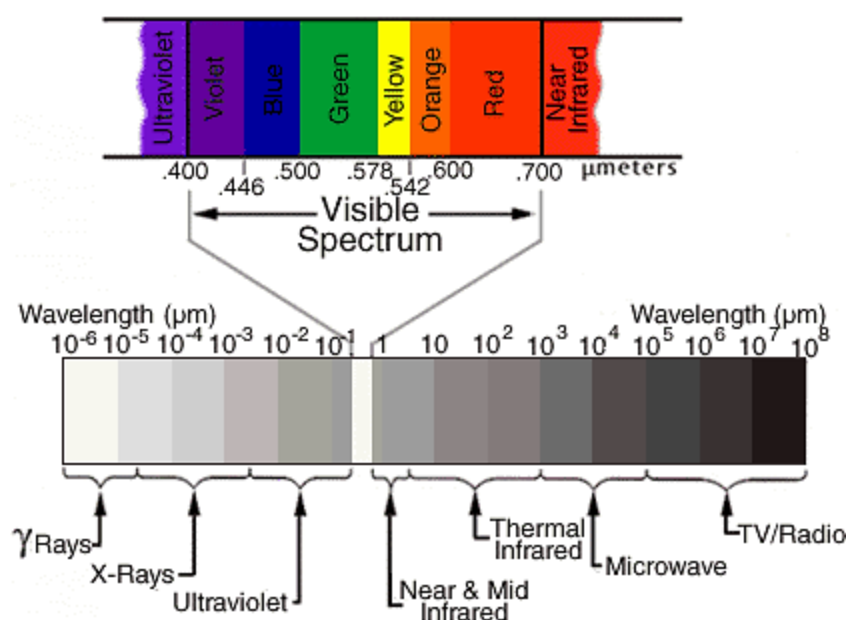


Figura A.1.1. Espectro visible (Fuente: <http://ocw.um.es/ciencias/herramientas-de-teledeteccion-aplicadas-a-la/material-de-clase-1/tema-1-fundamentos-fisicos-de-la-teledeteccion.pdf>)

1.3 Espectro visible

La región del espectro electromagnético que detecta el ojo humano se llama espectro visible esta región comprende desde los 0,4 μm hasta los 0,7 μm (Liou, 2002), a su vez es clasificada en colores por ciertas células especializadas en detectar las longitudes de onda provenientes de nuestro entorno, el rango espectral de los colores es:

COLORES	Longitud de onda	
	Nanómetros (nm)	Micrómetros (μm)
Violeta	400 – 446	0,40 – 0,446
Azul	446 – 500	0,446 – 0,500
Verde	500 – 578	0,500 – 0,578
Amarillo	578 – 592	0,578 – 0,592
Naranja	592 – 620	0,592 – 0,620
Rojo	620 – 700	0,620 – 0,700

1.4 Magnitudes radiométricas básicas

a) **Energía radiante** (Q).- es el total de energía radiada por un cuerpo en todas direcciones, se mide en julios (J).

b) **Flujo radiante** (Φ).- es la energía radiante transferida por radiación de una superficie a otra por unidad de tiempo, $\Phi = Q/t$ y se mide en $J s^{-1} = W$.

c) **Ángulo sólido o ángulo cónico** (Ω).- es el ángulo tridimensional formado en el vértice de un cono y tiene por unidad al estereorradián (sr). Ω , Está definida como la relación del área (σ) de una superficie esférica y el cuadrado del radio de la esfera (Liou, 2002). Para el caso particular de una esfera de superficie $\sigma = 4\pi r^2$, donde r es el radio de la esfera se tiene 4π estereorradianes.

$$\Omega = \frac{\sigma}{r^2} \quad (A.1.4)$$

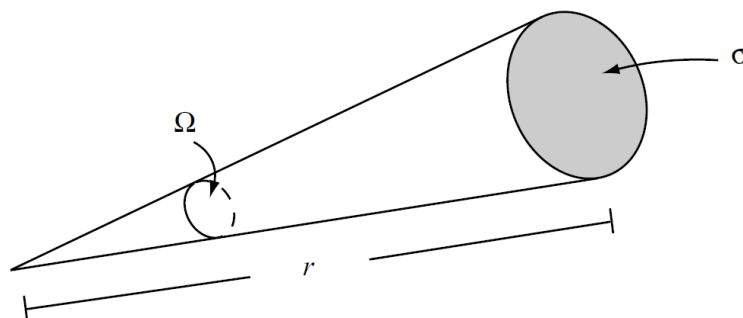


Figura A.1.2. Definición del ángulo sólido, donde ρ representa el área y r la distancia (Liou, 2002).

d) Emitancia radiante (M).- es la energía emitida por radiación desde una superficie por unidad de tiempo y de superficie (cantidad de energía que se transmite cada segundo por cada metro cuadrado de la superficie emisora) $M = \Phi/A = Q/tA$, se mide en $J s^{-1} m^{-2} = W m^{-2}$. A veces se habla de la emitancia espectral M_λ para hacer referencia a la emitancia en una longitud de onda concreta, en cuyo caso las unidades son $J s^{-1} m^{-2} \mu^{-1} = W m^{-2} \mu^{-1}$.

e) Radiancia (L).- es el flujo radiante (Φ) que abandona una unidad de área en una dirección particular siguiendo un ángulo sólido particular. Las unidades en que se mide son $W m^{-2} sr^{-1}$. Su importancia estriba en que es la magnitud que detecta el sensor. Si la radiancia se refiere a una porción concreta del espectro electromagnético se le denomina radiancia espectral (L_λ).

$$L = \frac{\Phi}{\Omega \cos \theta A} \quad (A.1.5)$$

Donde, θ es el ángulo formado por la dirección del flujo radiante y el vector perpendicular a la superficie receptora de tamaño A.

f) Reflectancia (ρ). - es la parte de la irradiancia que refleja la superficie receptora, matemáticamente se calcula como: la razón del flujo radiante reflejado con respecto al flujo radiante incidente a una superficie (Chávez, 2010).

g) Absortancia (α).- es la parte de la irradiancia que absorbe la superficie receptora. Y se calcula como: la razón del flujo radiante absorbido con respecto al flujo radiante incidente a una superficie.

h) Transmitancia (τ).- es la razón del flujo radiante transmitido con respecto al flujo radiante incidente a una superficie (Chávez, 2010).

2. Algoritmos en lenguaje de programación IDL

Primer algoritmo

en

```
pro MOD04_3K_PROCESO
;AEROSOL 3 KM

input_FC='E:\IMAGENES_MOD04_3K_2020\2019\' ;aerosol modis archivo .tif Entrada
output_dir='E:\Procesado_2019\2019_t_proceso_1\' ;SALIDA
;-----
files= FILE_SEARCH(input_FC + '*.tif', count=count);
f_scala=0.001;FACTOR DE ESCALA MOD04_3K y MOD04 DE 10 km
;-----
nombres_FC=file_basename(files) ;aquí estan solo los nombres de los archivos
for i=0,count-1 do begin
    envi_open_file,files[i] ,r_fid=fid1
    envi_file_query, fid1, ns=ns, nl=nl, nb=nb, dims=dims
    b1=uintarr(ns,nl)
    b1=envi_get_data(fid=fid1,dims=dims,pos=0);;data MOD04
    b1=float(b1)
    b1[WHERE(b1 eq -9999)]=!Values.F_NaN ; Los valores del background tienen valor -9999
    b1=b1*f_scala;
    map_info=envi_get_map_info(fid=fid1)
    day=uint(strmid(nombres_FC[i],14,3))
    fname=output_dir +strtrim(string(day),1)
    openw,unit,fname,/get_lun
    writeu,unit,b1
    free_lun,unit
    envi_setup_head,fname=fname,ns=ns,nl=nl,nb=1,interleave=0,data_type=4,offset=0,$
        map_info=map_info,/write
    PRINT,'PROCESADO: ',strtrim(string(i+1),1),' de ',strtrim(string(count),1)
endfor
;-----Borramos los archivos cargados al ENVI-----
fids = envi_get_file_ids()
ss=n_elements(fids)
FOR i=0,ss-1 DO BEGIN
    envi_file_mng, id=fids[i], /remove
end
print,'FIN DE PROCESO'
```

Segundo algoritmo

```

pro apilado_mensual_MOD04
; ESTE PROGRAMA HACE EL APILADO MENSUAL A PARTIR DE LOS ARCHIVOS DIARIOS
;-----RUTAS DE PROCESAMIENTO-----
dir_input='E:\Procesado_2019\2019_t_proceso_1\' ; archivos de entrada
dir_output='E:\Procesado_2019\2019_t_proceso_2\' ; directorio de salida
;-----
año = fltarr(1)
READ, año, PROMPT='Ingrese el año de los datos : ' ; Leyendo el dato desde terminal
x=año
CASE x OF
    2000: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2001: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2002: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2003: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2004: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2005: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2006: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2007: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2008: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2009: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2010: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2011: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2012: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2013: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2014: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2015: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2016: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2017: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2018: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2019: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
    2020: PRINT, '%-----año dentro del intervalo-----%'
ELSE: BEGIN
    print, '%-----AÑO FUERA DEL RANGO-----%'
    print, '%-----INGRESAR NUEVAMENTE-----%'
    RETURN
END
-----

r=isleap(año)
if (r eq 0)then begin
    print, '%-----AÑO NO BISIESTO-----%'
    ; dias = [0,31,59,90,120,151,181,212,243,273,304,334,366]
    dias = uint([1,32,60,91,121,152,182,213,244,274,305,335,365])
endif else begin
    print, '%-----AÑO BISIESTO-----%'
    dias = uint([1,32,61,92,122,153,183,214,245,275,306,336,366])
endif
endelse
;-----

files = FILE_SEARCH(dir_input+'*.HDR', count=count)
names=file_basename(files, '.HDR')
file_names=dir_input+file_basename(files, '.HDR')
print, 'NUMERO TOTAL DE ARCHIVOS: ', count
; print, names
;-----
mes=['ENERO', 'FEBRERO', 'MARZO', 'ABRIL', 'MAYO', 'JUNIO', 'JULIO', 'AGOSTO', 'SEPTIEMBRE', 'OCTUBRE', 'NOVIEMBRE', 'DICIEMBRE']
;-----

```

```

a=strarr(1,31);

for j=0,11 do begin
    k1=0
    for i=0, count-1 do begin
        y=uint(names[i])
        if ((y GE dias[j]) AND (y LE dias[j+1]-1)) then begin
            a(*,k1)=file_names[i]
            k1=k1+1
        endif
    endfor
    if (k1 gt 0) then begin
        print,'HAY ',strtrim(k1,1), ' ARCHIVOS PARA EL MES DE ',mes[j]
        ruta_scenas=a(0:(k1-1))
        count1=long(k1)
        ruta_salida= dir_output +mes[j]+'_'+strtrim(uint(año),1)
        print,'          APILANDO LAS IMAGENES ....'
        ff=funcion_apilado(ruta_scenas,count1,ruta_salida); APILANDO USANDO UNA FUNCION
    endif else begin
        print,'NO HAY ARCHIVOS PARA EL MES DE ',mes[j]
    endelse
endfor
;-----Borramos los archivos cargados al ENVI-----
fids = envi_get_file_ids()
ss=n_elements(fids)
FOR i=0,ss-1 DO BEGIN
    envi_file_mng, id=fids[i], /remove
end
print, '-----FIN DE PROCESAMIENTO-----'

end

function isleap,año
; Retorna 1 si el año es bisiesto.
result = ( (fix(año mod 4) eq 0 AND fix(año mod 100) ne 0) $
OR (fix(año mod 400) eq 0) )
return,result
end

function funcion_apilado,ruta_scenas,count1,ruta_salida

files = ruta_scenas
fid =fltarr(count1); la funcion lonarr devuelve un array de numeros long de puros ceros
pos = fltarr(count1)
dims = fltarr(5,count1)
out_bname=strarr(count1)
ss1=strarr(count1)
for i=0,count1-1 DO BEGIN
    ss1[i]=file_basename(files(i))
endfor
FOR i=0,count1-1 DO BEGIN
    envi_open_data_file, files(i), r_fid=layer_fid
    ENVI_FILE_QUERY, layer_fid, NS = ns, NL = nl, NB = nb, sname=sname ;sname es el nombre completo de la imagen
    fid[i] = layer_fid ;tenemos un conjunto de identificadores
    pos[i] = 0 ; ELEGIMOS QUE BANDA ENTRARA AL APILADO FINAL; 0:primera banda, 1: segunda banda, y asi...
    dims[0,i] = [-1,0,ns-1,0,nl-1]
Endfor

out_name = ruta_salida
out_dt = 4 ; Tipo de salida = float
out_proj = envi_get_projection(fid=layer_fid, pixel_size=out_ps);

envi_doit, 'envi_layer_stacking_doit', fid=fid, pos=pos, dims=dims, $
    out_dt=out_dt, out_name=out_name, $
    out_bname = ss1, $
    interp=0, out_ps=out_ps, $
    out_proj=out_proj, r_fid=r_fid

```

Tercer algoritmo

```
pro prom_compuesto_auto
```

```

;-----ESTE PROGRAMA OBTIENE EL PRIMEDIO MENSUAL-----
dir_input='E:\Procesado_2019\2019_t_proceso_2\'
dir_output='E:\Procesado_2019\2019_t_proceso_3\'
;-----
files = FILE_SEARCH(dir_input + '*.hdr', count=count) ; Llamando los apilados en .img
;-----automatizando-----
name = file_basename(files, '.hdr')
for k=0,count-1 do begin
    print, 'PROCESANDO APILADO: ',k+1
    envi_open_file, files(k), r_fid=fid
    envi_file_query, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt, dims=dims
    pos=lindgen(nb)
    data=fltarr(ns, nl, nb) ; array tridimensional
    for i=0, nb-1 do begin
        data[:,*,i] = envi_get_data(fid=fid,dims=dims,pos=i)
    endfor
;-----
data[WHERE(data le 0.0, /NULL)] = !VALUES.F_NAN; ultima modificación 19-08-2020
;-----
;-----MAP INFO-----
map_info = envi_get_map_info(fid=fid) ; mapinfo para los datos de salida
;-----
;max_data=max(data,dimension=3); aca se saca el maximo
prom_data=mean(data,dimension=3,/NaN)
fname=dir_output+'PROMEDIO_MENSUAL_'+name[k] ; SALIDA DEL ARCHIVO
openw, unit, fname, /get_lun
writeu, unit,prom_data
free_lun, unit
ENVI_SETUP_HEAD, fname=fname, ns=ns, nl=nl, nb=1,interleave=0, data_type=4,wavelength_unit=0,$
offset=0, map_info=map_info,/write,/open
endfor

;-----
data[WHERE(data le 0.0, /NULL)] = !VALUES.F_NAN; ultima modificación 19-08-2020
;-----
;-----MAP INFO-----
map_info = envi_get_map_info(fid=fid) ; mapinfo para los datos de salida
;-----
;max_data=max(data,dimension=3); aca se saca el maximo
prom_data=mean(data,dimension=3,/NaN)
fname=dir_output+'PROMEDIO_MENSUAL_'+name[k] ; SALIDA DEL ARCHIVO
openw, unit, fname, /get_lun
writeu, unit,prom_data
free_lun, unit
ENVI_SETUP_HEAD, fname=fname, ns=ns, nl=nl, nb=1,interleave=0, data_type=4,wavelength_unit=0,$
offset=0, map_info=map_info,/write,/open
endfor
;-----Borramos los archivos cargados al ENVI-----
fids = envi_get_file_ids()
ss=n_elements(fids)
FOR i=0,ss-1 DO BEGIN
    envi_file_mng, id=fids[i], /remove
end
print,'FIN DE PROCESO'
END

```

Cuarto algoritmo

```
pro promedio_anual
;promedio anual de apilado mensual
file_entrada='C:\Users\PROFESIONAL\Desktop\TESIS_2020\RESULTADOS TERRA\APILADO AYACUCHO TERRA\2019_t_apilado'; cargar las imagenes apiladas
file_Salida='C:\Users\PROFESIONAL\Desktop\PROMEDIO ANUAL AYACUCHO TERRA\PROMEDIO_ANUAL_2019'
;-----LECTURA DE ARCHIVOS-----
;AÑO='2003'; COLOCAR EL AÑO
envi_open_file,file_entrada,r_fid=fid;,/INVISIBLE, /NO_INTERACTIVE_QUERY, /NO_REALIZE
if (fid eq -1) then begin
    print,'LECTURA INCORRECTA DEL ARCHIVO'
    print,'VERIFICAR'
    return
endif
; EN NUESTRO CASO AMBOS APILADOS TIENEN LAS MISMAS DIMENSIONES
envi_file_query, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb,dims=dims
pos=lindgen(nb)
data=fltarr(ns, nl, nb) ; array tridimensional
For i=0, nb-1 Do Begin
    data[:,*,i] = envi_get_data(fid=fid,dims=dims,pos=i)
Endfor
map_info = envi_get_map_info(fid=fid) ; mapinfo para los datos de salida
promedio=mean(data,dimension=3,/NaN)
fname=file_Salida
openw, unit, fname, /get_lun
writeu, unit,promedio
free_lun, unit
bnames=['PROMEDIO_ANUAL']
ENVI_SETUP_HEAD, fname=fname, ns=ns, nl=nl, nb=1, bnames=bnames,$
interleave=0, data_type=4, offset=0, map_info=map_info,/write,/open
print,'FIN DE PROCESAMIENTO'

end
```

Quinto algoritmo

pro climatologia_mensual

```
;Calcula la climatologia promedio mensual de ENERO a DICIEMBRE
;Cargar el apilado cuyas bandas deben estar ordenados temporalmente.
;obs: Todos los años deben estar completos
;-----
File_input='C:\Users\PROFESIONAL\Desktop\TESIS_2020\APILADO MENSUAL AYACUCHO
17 AÑOS CORREGIDO\apilado_mensual_AQUA_ayacucho_17_años'; archivo de entrada
dir_output='C:\Users\PROFESIONAL\Desktop\CLIMATOLOGIA-AQUA\' ; carpeta de
salida
;-----
envi_open_file,File_input,r_fid=fid
envi_file_query, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb,
data_type=data_type,file_type=file_type, dims=dims
pos=lindgen(nb)
data=fltarr(ns, nl, nb) ; array tridimensional
For i=0, nb-1 Do Begin
    data[:,*,i] = envi_get_data(fid=fid,dims=dims,pos=i)
Endfor
map_info=envi_get_map_info(fid=fid)
Nyears=nb/12.0 ; numero de años
data_mes=fltarr(ns, nl, Nyears) ; array tridimensional
MESES=['ENERO', 'FEBRERO', 'MARZO', 'ABRIL', 'MAYO', 'JUNIO', 'JULIO', 'AGOSTO', 'SET
IEMBRE', 'OCTUBRE', 'NOVIEMBRE', 'DICIEMBRE']
for j=0,11 do begin
    for k=0,Nyears-1 do begin
        data_mes[:,*,k]=data[:,*,12*k+j]
    endfor
    fname=dir_output+'CLIMATOLOGIA_MENSUAL_'+MESES[j]+'_AQUA.img'
```

```

f=save_image(fname,mean(data_mes,dim=3,/NaN),ns,nl,1,map_info) ; Guardamos el
promedio cada 8 dias ya escalado
endfor

print,'FIN DE PROCESO'

end

function save_image,fname,data,ns,nl,nb,map_info
  openw, unit, fname, /get_lun
  writeu, unit,data
  free_lun, unit
  ENVI_SETUP_HEAD, fname=fname, ns=ns, nl=nl, nb=nb, $
    interleave=0, data_type=4, offset=0, map_info=map_info,/write
  return,'GUARDADO'
end

```

3. Resultados adicionales

A continuación, se presentan algunos resultados adicionales de comparación de AOD MODIS (Aqua y Terra) en el periodo de estudio 2003-2019.

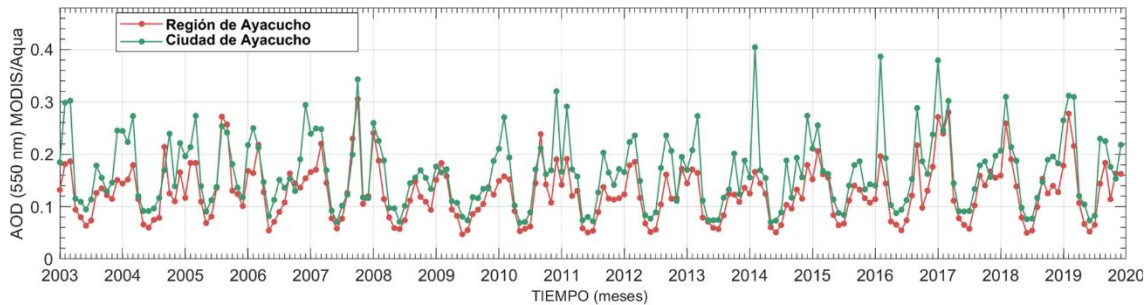


Figura A.3.1. Se muestra la comparación de las variaciones de los promedios mensuales AOD, de la región de Ayacucho y Ciudad de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite AQUA, periodo 2003-2019.

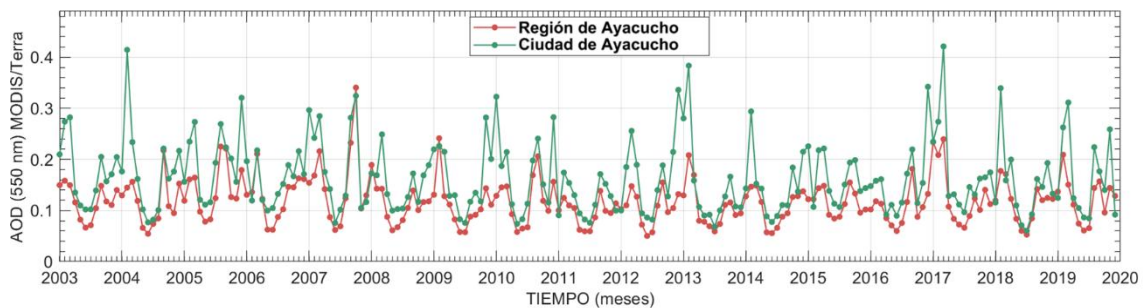


Figura A.3.2. Se muestra la comparación de las variaciones de los promedios mensuales AOD, de la región de Ayacucho y ciudad de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite TERRA, periodo 2003-2019.

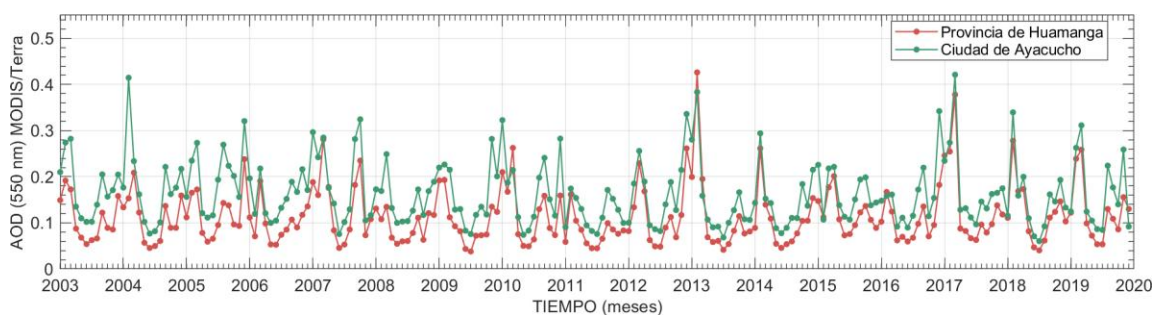


Figura A.3.3. Se muestra la comparación de las variaciones de los promedios mensuales AOD, de la provincia Huamanga y ciudad de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite TERRA, periodo 2003-2019.

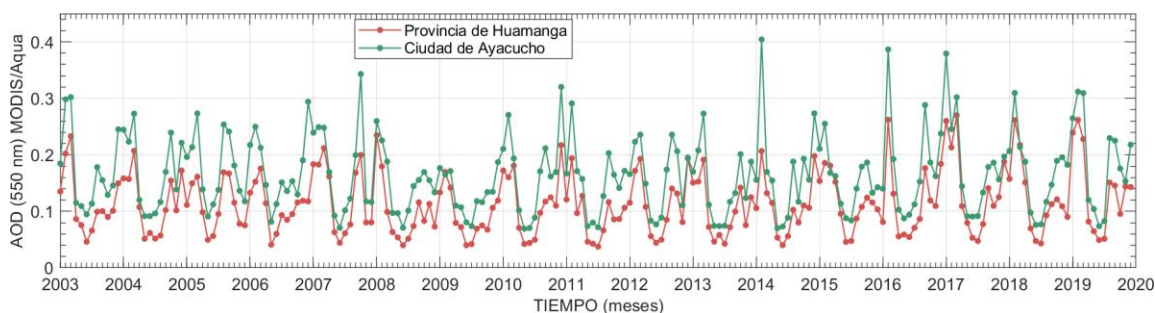


Figura A.3.4. Muestra la comparación de las variaciones de los promedios mensuales AOD, de la provincia Huamanga y ciudad de Ayacucho, observada por MODIS a bordo del satélite AQUA, periodo 2003-2019.

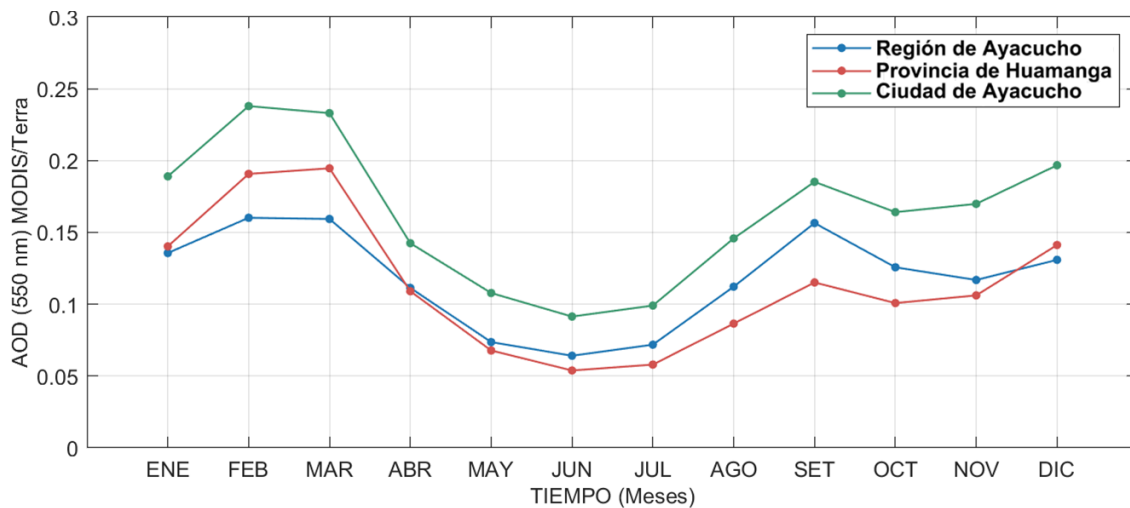


Figura A.3.5. Se muestra la comparación de las variaciones AOD de los promedios por meses de 17 años, en la región de Ayacucho, provincia Huamanga y ciudad de Ayacucho observada por MODIS a bordo del satélite Terra, periodo 2003-2019

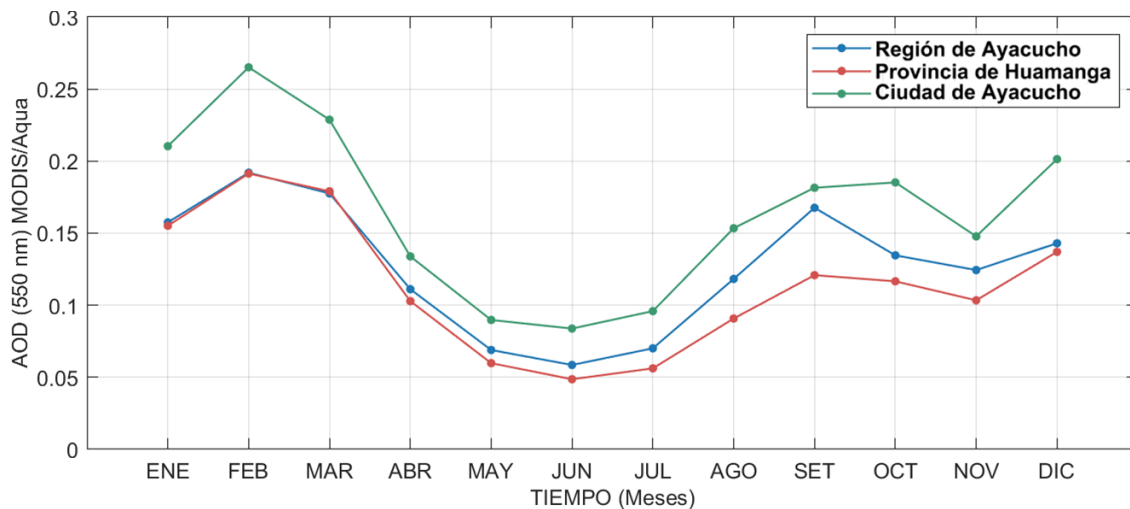


Figura A.3.6. Muestra la comparación de las variaciones AOD de los promedios por meses de 17 años, de la región de Ayacucho, provincia Huamanga y ciudad de Ayacucho observada por MODIS a bordo del satélite Aqua, periodo 2003-2019.

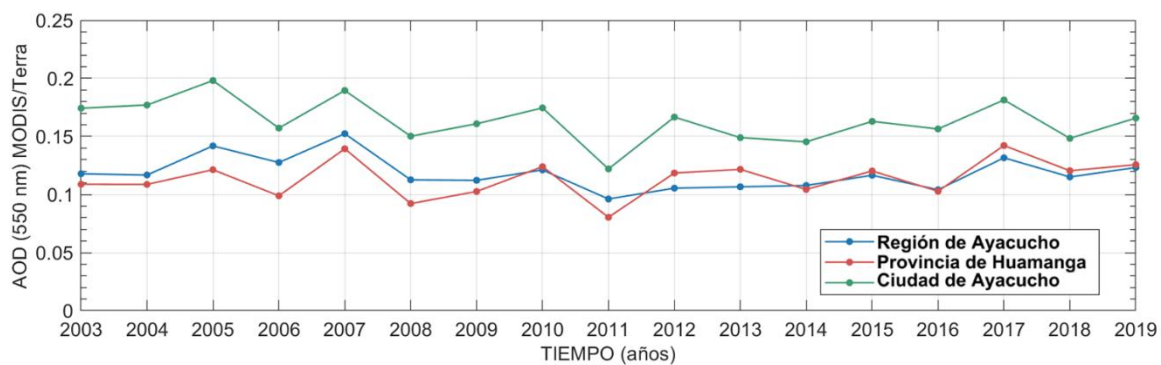


Figura A.3.7. Muestra la comparación de las variaciones de los promedios anuales AOD, de la región de Ayacucho, provincia Huamanga y ciudad de Ayacucho observada por MODIS a bordo del satélite Terra, periodo 2003-2019.

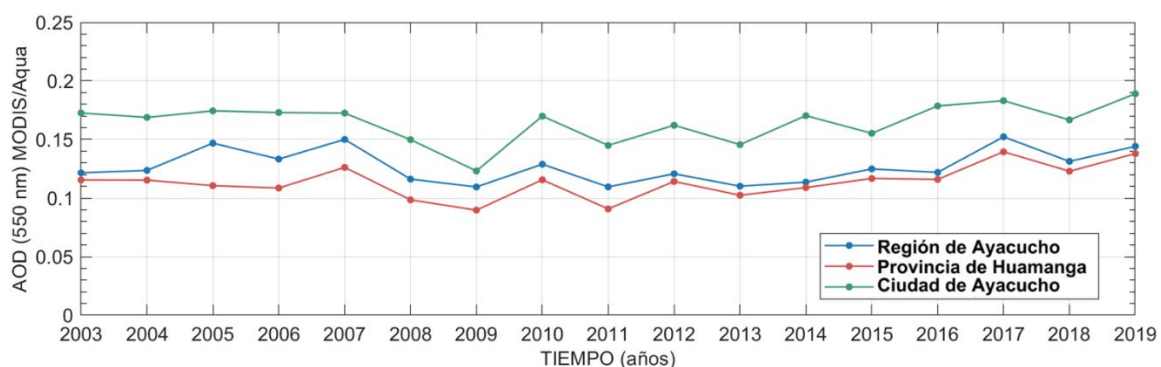


Figura A.3.8. Se muestra la comparación de las variaciones de los promedios anuales AOD, de la región de Ayacucho, provincia Huamanga y ciudad de Ayacucho observada por MODIS a bordo del satélite Aqua, periodo 2003-2019.

Tabla A.3.1*Datos AOD a partir de MOD04_3k y MYD04_3k*

	REGIÓN AYACUCHO		PROVINCIA HUAMANGA		CIUDAD DE AYACUCHO	
	TERRA	AQUA	TERRA	AQUA	TERRA	AQUA
ene-03	0.149776	0.131999	0.149074	0.135175	0.209843	0.184684
feb-03	0.158281	0.1813	0.191622	0.202338	0.273977	0.298356
mar-03	0.149667	0.18637	0.172513	0.233089	0.28225	0.302125
abr-03	0.1159	0.09403	0.08738	0.086418	0.135163	0.115095
may-03	0.082068	0.079857	0.067966	0.075627	0.109853	0.109349
jun-03	0.066501	0.063542	0.054041	0.046214	0.102049	0.09483
jul-03	0.071133	0.073561	0.062504	0.066106	0.102301	0.113616
ago-03	0.104472	0.126049	0.066165	0.099339	0.139298	0.178321
sep-03	0.148402	0.134841	0.12215	0.100387	0.20501	0.155236
oct-03	0.117711	0.121905	0.08914	0.089986	0.15689	0.129247
nov-03	0.11084	0.114647	0.085516	0.101023	0.1709	0.145821
dic-03	0.140044	0.150645	0.158087	0.149826	0.204614	0.245182
ene-04	0.129527	0.14417	0.133621	0.15834	0.176436	0.2445
feb-04	0.144845	0.151662	0.153181	0.157208	0.4145	0.22331
mar-04	0.156198	0.179143	0.208713	0.207311	0.233783	0.272868
abr-04	0.118751	0.114182	0.122386	0.107716	0.161787	0.120255
may-04	0.065976	0.06591	0.056785	0.051482	0.102178	0.09162
jun-04	0.054527	0.059877	0.045387	0.061935	0.076759	0.09163
jul-04	0.073761	0.07468	0.049717	0.051825	0.081848	0.096465
ago-04	0.084575	0.078647	0.060657	0.05726	0.100969	0.116469
sep-04	0.217579	0.214171	0.136632	0.102382	0.2213	0.16979
oct-04	0.108413	0.125134	0.089308	0.154503	0.162249	0.239333
nov-04	0.094968	0.110093	0.089188	0.101755	0.176265	0.138738
dic-04	0.152554	0.165536	0.159166	0.172225	0.216893	0.221355
ene-05	0.119043	0.116622	0.111821	0.111418	0.156228	0.196221
feb-05	0.161074	0.183433	0.165183	0.149511	0.234805	0.213572
mar-05	0.164368	0.183418	0.172338	0.161342	0.273404	0.273364
abr-05	0.097601	0.109633	0.078258	0.098376	0.121043	0.138973
may-05	0.078262	0.068688	0.05922	0.049615	0.111385	0.090816
jun-05	0.08273	0.080833	0.065493	0.056437	0.116223	0.112356
jul-05	0.124122	0.135754	0.095196	0.095488	0.19346	0.137986
ago-05	0.225291	0.271677	0.143024	0.169112	0.269322	0.253661
sep-05	0.220998	0.257028	0.137896	0.167114	0.223555	0.24129
oct-05	0.126282	0.130485	0.096601	0.115445	0.201677	0.181244
nov-05	0.123498	0.123839	0.093347	0.078046	0.156054	0.136448
dic-05	0.179239	0.101074	0.237961	0.075158	0.3206	0.117669
ene-06	0.13073	0.168112	0.111723	0.132911	0.196535	0.217553
feb-06	0.136045	0.164033	0.070771	0.152545	0.119468	0.249809
mar-06	0.21081	0.218184	0.190538	0.1759	0.217692	0.21263

abr-06	0.122939	0.127634	0.098561	0.114314	0.12073	0.146748
may-06	0.062669	0.054637	0.053236	0.041036	0.099924	0.08168
jun-06	0.062384	0.071013	0.052547	0.059992	0.10475	0.112922
jul-06	0.087246	0.089798	0.0741	0.093432	0.132581	0.151373
ago-06	0.102328	0.107854	0.085317	0.08502	0.151753	0.135921
sep-06	0.146132	0.163229	0.107071	0.095089	0.188848	0.15351
oct-06	0.145416	0.144522	0.090078	0.115938	0.167008	0.129859
nov-06	0.162826	0.136269	0.117312	0.118801	0.216155	0.190373
dic-06	0.161464	0.153971	0.13561	0.117716	0.171217	0.294131
ene-07	0.154171	0.166019	0.188264	0.183432	0.296502	0.239243
feb-07	0.168368	0.170408	0.160137	0.182797	0.24217	0.249219
mar-07	0.21605	0.220063	0.281092	0.21187	0.284808	0.248056
abr-07	0.141861	0.145315	0.177686	0.161691	0.175649	0.169503
may-07	0.086839	0.077441	0.083665	0.063101	0.141888	0.092464
jun-07	0.061917	0.058253	0.045562	0.044326	0.075583	0.070902
jul-07	0.069205	0.077141	0.052932	0.061293	0.101639	0.101875
ago-07	0.123902	0.126001	0.085649	0.076872	0.129218	0.122608
sep-07	0.232426	0.229732	0.182258	0.168276	0.28158	0.199588
oct-07	0.340571	0.305346	0.234851	0.199823	0.324394	0.343155
nov-07	0.103954	0.105275	0.07311	0.080422	0.104979	0.117532
dic-07	0.129655	0.119934	0.107896	0.080485	0.116599	0.116387
ene-08	0.189261	0.240412	0.130903	0.234771	0.172638	0.259767
feb-08	0.142637	0.187654	0.107759	0.179633	0.168936	0.225687
mar-08	0.142446	0.114564	0.134652	0.099083	0.248935	0.188236
abr-08	0.087604	0.07951	0.067805	0.063364	0.132171	0.097268
may-08	0.061322	0.059118	0.054724	0.053936	0.099908	0.096777
jun-08	0.067413	0.057266	0.059869	0.040128	0.102802	0.071081
jul-08	0.081189	0.073935	0.060548	0.051625	0.103805	0.101412
ago-08	0.105136	0.1115	0.078107	0.073885	0.126409	0.144807
sep-08	0.139325	0.148101	0.111109	0.115944	0.172441	0.155547
oct-08	0.100883	0.118722	0.063262	0.083067	0.117026	0.169521
nov-08	0.116615	0.109413	0.121023	0.113238	0.168881	0.154951
dic-08	0.118017	0.093792	0.116887	0.072954	0.188853	0.133744
ene-09	0.130774	0.151092	0.191955	0.133562	0.219781	0.176544
feb-09	0.241509	0.183019	0.192979	0.169673	0.2264	0.16519
mar-09	0.128056	0.158026	0.112114	0.141982	0.215	0.171411
abr-09	0.111734	0.094643	0.09256	0.079476	0.128627	0.110186
may-09	0.082475	0.082352	0.081769	0.072198	0.129854	0.107161
jun-09	0.057979	0.047263	0.043432	0.040147	0.082883	0.080643
jul-09	0.057638	0.054968	0.037885	0.04208	0.075723	0.073904
ago-09	0.087978	0.085958	0.07214	0.069289	0.117261	0.118116
sep-09	0.091545	0.094224	0.073067	0.075074	0.134797	0.116276
oct-09	0.102255	0.105216	0.074759	0.067615	0.117953	0.134108
nov-09	0.143497	0.137192	0.13498	0.106363	0.281976	0.134621

dic-09	0.111423	0.122948	0.123818	0.119052	0.200755	0.18722
ene-10	0.128839	0.149075	0.209941	0.172379	0.322658	0.210573
feb-10	0.145417	0.157756	0.167417	0.160343	0.187067	0.270611
mar-10	0.14723	0.152299	0.262486	0.180929	0.214529	0.193712
abr-10	0.092801	0.091509	0.07535	0.07089	0.112273	0.102064
may-10	0.058036	0.052978	0.050132	0.042268	0.073954	0.069168
jun-10	0.064588	0.057771	0.049145	0.044147	0.083115	0.070662
jul-10	0.067245	0.061989	0.064021	0.049718	0.113315	0.089036
ago-10	0.169108	0.144617	0.129688	0.097312	0.197937	0.17092
sep-10	0.206084	0.238447	0.158619	0.117323	0.240839	0.211502
oct-10	0.118912	0.142174	0.088728	0.12481	0.151118	0.16174
nov-10	0.099431	0.107656	0.073488	0.110007	0.115617	0.169441
dic-10	0.156331	0.190233	0.159135	0.217138	0.282611	0.320259
ene-11	0.100375	0.141675	0.05873	0.120981	0.090658	0.166976
feb-11	0.124609	0.190979	0.161272	0.19388	0.174231	0.291181
mar-11	0.11	0.120443	0.104615	0.096909	0.153954	0.171226
abr-11	0.104907	0.130167	0.08492	0.127466	0.13013	0.157381
may-11	0.062326	0.058582	0.055655	0.046266	0.094536	0.073815
jun-11	0.059296	0.05076	0.045002	0.042674	0.082352	0.080198
jul-11	0.059462	0.05392	0.044828	0.03752	0.075891	0.071879
ago-11	0.086452	0.089654	0.065545	0.066438	0.111256	0.127206
sep-11	0.13844	0.137387	0.099278	0.116484	0.17123	0.203019
oct-11	0.099227	0.115508	0.085595	0.085789	0.152053	0.16493
nov-11	0.095217	0.113375	0.076269	0.086506	0.128231	0.141398
dic-11	0.113845	0.116274	0.08334	0.106385	0.099751	0.171711
ene-12	0.102621	0.123274	0.082063	0.115306	0.100113	0.165916
feb-12	0.110219	0.17891	0.13371	0.171909	0.185138	0.223286
mar-12	0.14764	0.185547	0.229106	0.192984	0.255865	0.235879
abr-12	0.126951	0.116679	0.168158	0.107929	0.189446	0.149147
may-12	0.072356	0.067717	0.062605	0.056037	0.094671	0.083389
jun-12	0.050236	0.051572	0.049006	0.044477	0.086196	0.077044
jul-12	0.057415	0.055837	0.048268	0.049781	0.082055	0.089064
ago-12	0.109407	0.104298	0.08957	0.085022	0.139997	0.173943
sep-12	0.155097	0.161234	0.112594	0.140411	0.188438	0.235886
oct-12	0.09683	0.115139	0.068761	0.131602	0.127644	0.2065
nov-12	0.104785	0.116497	0.116982	0.080945	0.21471	0.110903
dic-12	0.132082	0.172084	0.261379	0.193818	0.336	0.195094
ene-13	0.129506	0.144337	0.19938	0.150956	0.280368	0.170124
feb-13	0.208258	0.171024	0.426125	0.15276	0.383533	0.207794
mar-13	0.169496	0.164219	0.194986	0.191444	0.158681	0.27304
abr-13	0.080065	0.079037	0.068916	0.072333	0.106921	0.111638
may-13	0.078012	0.071395	0.058477	0.046391	0.090301	0.074364
jun-13	0.069289	0.059453	0.060902	0.058289	0.091796	0.073994
jul-13	0.059036	0.05712	0.041493	0.042628	0.068362	0.074597

ago-13	0.073776	0.083166	0.054176	0.071915	0.100216	0.11701
sep-13	0.111029	0.123955	0.082847	0.09968	0.127482	0.132399
oct-13	0.115783	0.123087	0.114405	0.142037	0.166266	0.2012
nov-13	0.091175	0.108969	0.076864	0.075454	0.107887	0.123666
dic-13	0.094502	0.135926	0.08129	0.124887	0.10625	0.18802
ene-14	0.127559	0.124931	0.089001	0.105742	0.143372	0.155678
feb-14	0.146481	0.166559	0.261539	0.206668	0.293964	0.404321
mar-14	0.148879	0.144464	0.139316	0.132176	0.152296	0.169634
abr-14	0.116861	0.12428	0.1091	0.11498	0.142823	0.154694
may-14	0.057362	0.060461	0.054743	0.053408	0.088502	0.070243
jun-14	0.055752	0.05091	0.045651	0.040189	0.077589	0.073222
jul-14	0.066055	0.064681	0.053777	0.056173	0.089226	0.088904
ago-14	0.087841	0.103411	0.059765	0.102873	0.110683	0.188095
sep-14	0.094707	0.096239	0.077184	0.080357	0.110214	0.116925
oct-14	0.12647	0.132443	0.104252	0.110465	0.184014	0.193231
nov-14	0.12811	0.115101	0.104643	0.10633	0.136974	0.156008
dic-14	0.137651	0.179499	0.15371	0.197914	0.215013	0.273455
ene-15	0.122211	0.152021	0.147207	0.153758	0.225756	0.210739
feb-15	0.12211	0.206023	0.112169	0.185838	0.106983	0.255163
mar-15	0.143758	0.161695	0.177059	0.181078	0.217924	0.167975
abr-15	0.148406	0.155272	0.201209	0.152104	0.221348	0.162575
may-15	0.091518	0.083892	0.107493	0.095805	0.138476	0.113748
jun-15	0.084351	0.064486	0.072943	0.045889	0.113252	0.08791
jul-15	0.087726	0.067565	0.075811	0.047736	0.106851	0.083995
ago-15	0.112618	0.111549	0.094999	0.087339	0.150811	0.140325
sep-15	0.154961	0.140137	0.122649	0.108005	0.193822	0.179188
oct-15	0.133283	0.132282	0.136378	0.124214	0.198667	0.18653
nov-15	0.095975	0.116285	0.106482	0.115718	0.138136	0.132727
dic-15	0.101911	0.107453	0.089075	0.103396	0.14395	0.142704
ene-16	0.101999	0.114081	0.102441	0.08121	0.14782	0.140159
feb-16	0.118081	0.196298	0.16691	0.26214	0.158156	0.386588
mar-16	0.11325	0.144027	0.124287	0.131257	0.161308	0.192606
abr-16	0.085118	0.071576	0.061889	0.055732	0.091819	0.102989
may-16	0.070772	0.065638	0.069748	0.058945	0.111091	0.087596
jun-16	0.05983	0.054876	0.059566	0.054594	0.089774	0.094038
jul-16	0.075579	0.07381	0.067598	0.070989	0.115441	0.112349
ago-16	0.11669	0.12107	0.097883	0.086532	0.172044	0.152731
sep-16	0.181597	0.217269	0.135463	0.176473	0.219625	0.288273
oct-16	0.087606	0.097905	0.070738	0.119358	0.114346	0.186599
nov-16	0.106603	0.130565	0.095291	0.109496	0.153911	0.162279
dic-16	0.132506	0.176037	0.182188	0.184145	0.34213	0.237727
ene-17	0.233687	0.271212	0.245855	0.259985	0.234571	0.379333
feb-17	0.20862	0.239579	0.254585	0.213201	0.27385	0.245549
mar-17	0.239538	0.280338	0.377985	0.270013	0.42113	0.301884

abr-17	0.107568	0.111255	0.087633	0.109255	0.128367	0.144563
may-17	0.083726	0.077586	0.082325	0.079802	0.131632	0.091235
jun-17	0.072644	0.06524	0.066677	0.053145	0.111706	0.090881
jul-17	0.066277	0.057695	0.062896	0.047515	0.096726	0.091619
ago-17	0.089386	0.102321	0.096222	0.077466	0.145987	0.13362
sep-17	0.123676	0.158977	0.079044	0.141092	0.131298	0.178657
oct-17	0.101221	0.140668	0.097122	0.109823	0.162417	0.186273
nov-17	0.140509	0.167305	0.137928	0.12525	0.16505	0.15663
dic-17	0.112616	0.155147	0.11806	0.187798	0.174779	0.197027
ene-18	0.119493	0.159402	0.110829	0.157561	0.1155	0.206934
feb-18	0.177478	0.258864	0.278006	0.261491	0.3394	0.309601
mar-18	0.171201	0.190358	0.16868	0.217608	0.158889	0.213774
abr-18	0.122824	0.13859	0.173065	0.151253	0.199722	0.187633
may-18	0.08385	0.079121	0.081728	0.069925	0.109887	0.097863
jun-18	0.060082	0.050074	0.046943	0.047505	0.0709	0.076064
jul-18	0.052908	0.05435	0.040369	0.043148	0.060269	0.077071
ago-18	0.084451	0.099277	0.061577	0.093014	0.092452	0.117008
sep-18	0.141991	0.153173	0.111373	0.112755	0.161644	0.147094
oct-18	0.120223	0.125211	0.123816	0.12135	0.146132	0.189476
nov-18	0.12464	0.139715	0.146581	0.109063	0.19303	0.195812
dic-18	0.122689	0.127645	0.102969	0.090137	0.133064	0.182535
ene-19	0.136872	0.178325	0.122055	0.239297	0.124604	0.264855
feb-19	0.209217	0.277414	0.239044	0.261968	0.262688	0.311821
mar-19	0.150641	0.215615	0.258567	0.227868	0.311375	0.309306
abr-19	0.111518	0.107014	0.098774	0.081886	0.124213	0.120167
may-19	0.074395	0.066727	0.072251	0.064745	0.104757	0.1042
jun-19	0.060812	0.052221	0.053663	0.049274	0.086394	0.073662
jul-19	0.065388	0.065239	0.053502	0.051464	0.084642	0.08277
ago-19	0.144133	0.143902	0.130014	0.150995	0.223977	0.229684
sep-19	0.156914	0.183598	0.108795	0.145647	0.176679	0.225124
oct-19	0.095986	0.114083	0.085872	0.095455	0.140059	0.175909
nov-19	0.144344	0.163112	0.155643	0.144056	0.258889	0.153389
dic-19	0.128691	0.162556	0.130054	0.143064	0.091875	0.218075

Fuente: datos alcanzados en el estudio, a partir del procesamiento de imágenes MOD04_3k y MYD04_3k.

Tabla A.3.2

Valores de AOD, Aqua y de AERONET usados en la validación (I).

	Aqua	In situ		Aqua	In situ		Aqua	In situ		Aqua	In situ
1	0.2343	0.0144	51	0.0340	0.0608	101	0.0539	0.0684	151	0.1240	0.0296
2	0.1297	0.0191	52	0.1920	0.0720	102	0.0270	0.0734	152	0.1313	0.0321
3	0.0904	0.0174	53	0.1120	0.0681	103	0.0260	0.0362	153	0.1520	0.0907
4	0.0778	0.0296	54	0.1550	0.1640	104	0.0160	0.0431	154	0.0962	0.0486
5	0.1257	0.0363	55	0.0240	0.0630	105	0.0384	0.0496	155	0.1260	0.0488
6	0.1560	0.0381	56	0.0100	0.0339	106	0.0847	0.0768	156	0.0423	0.0654
7	0.0910	0.0480	57	0.0630	0.0221	107	0.0336	0.0885	157	0.0236	0.0368
8	0.0905	0.0250	58	0.2160	0.0542	108	0.0348	0.0648	158	0.0591	0.0684
9	0.0973	0.0278	59	0.1015	0.0198	109	0.0558	0.1562	159	0.0350	0.0361
10	0.0380	0.0254	60	0.1587	0.0823	110	0.1033	0.1634	160	0.0550	0.0597
11	0.0780	0.0352	61	0.1507	0.0332	111	0.2547	0.2888	161	0.0415	0.0494
12	0.0690	0.0328	62	0.0270	0.0393	112	0.1559	0.1493	162	0.0220	0.0532
13	0.1280	0.0714	63	0.0100	0.0234	113	0.1472	0.1858	163	0.0440	0.0391
14	0.0416	0.0275	64	0.0174	0.0447	114	0.2725	0.2478	164	0.0220	0.0734
15	0.0944	0.0520	65	0.0560	0.0303	115	0.0560	0.0610	165	0.1040	0.0935
16	0.1229	0.0494	66	0.2040	0.0448	116	0.1128	0.1162	166	0.0592	0.0539
17	0.0208	0.0463	67	0.1360	0.0278	117	0.1178	0.0626	167	0.0880	0.0525
18	0.0284	0.0424	68	0.1680	0.0599	118	0.0693	0.0873	168	0.0524	0.0599
19	0.0067	0.0282	69	0.2283	0.0612	119	0.0260	0.0773	169	0.0150	0.0593
20	0.0632	0.0678	70	0.0613	0.0452	120	0.1054	0.1194	170	0.0250	0.0774
21	0.1670	0.0756	71	0.1975	0.0428	121	0.0443	0.1847	171	0.0220	0.0509
22	0.0833	0.0598	72	0.1025	0.0497	122	0.1140	0.0821	172	0.0170	0.0808
23	0.0450	0.0493	73	0.2015	0.0618	123	0.1280	0.0685	173	0.0723	0.0586
24	0.0140	0.0396	74	0.0893	0.0364	124	0.0080	0.0719	174	0.0383	0.0609
25	0.0303	0.0292	75	0.1180	0.0231	125	0.1100	0.0827	175	0.0250	0.0738
26	0.0350	0.0395	76	0.1240	0.0143	126	0.0985	0.0436	176	0.0430	0.0419
27	0.0260	0.0463	77	0.0290	0.0125	127	0.0570	0.0440	177	0.0050	0.0808
28	0.0140	0.0742	78	0.0274	0.0283	128	0.1260	0.0452	178	0.0320	0.0584
29	0.0180	0.0301	79	0.0124	0.0170	129	0.0567	0.0460	179	0.0978	0.0854
30	0.0253	0.0521	80	0.0463	0.0453	130	0.1580	0.0769	180	0.0530	0.0664
31	0.0695	0.0897	81	0.0529	0.0326	131	0.0447	0.0318	181	0.0135	0.0794
32	0.0313	0.0623	82	0.0233	0.0322	132	0.0763	0.0454	182	0.0549	0.0975
33	0.0755	0.0689	83	0.1046	0.0451	133	0.0080	0.0821	183	0.0636	0.0705
34	0.0420	0.0816	84	0.1535	0.0696	134	0.0450	0.1190	184	0.1176	0.1297
35	0.0374	0.0491	85	0.0540	0.0773	135	0.1132	0.1127	185	0.1780	0.1391
36	0.0469	0.0514	86	0.0080	0.0396	136	0.1380	0.1039	186	0.0020	0.0861
37	0.0427	0.0598	87	0.1200	0.0530	137	0.0990	0.0693	187	0.1958	0.1105
38	0.0448	0.0419	88	0.0230	0.0400	138	0.1480	0.0532	188	0.0960	0.0956
39	0.0911	0.1214	89	0.0270	0.0444	139	0.1220	0.0198	189	0.0340	0.0392
40	0.0714	0.0822	90	0.0203	0.0357	140	0.1500	0.0738	190	0.0244	0.0741
41	0.0144	0.1092	91	0.0020	0.0307	141	0.1712	0.0938	191	0.3000	0.1891
42	0.0969	0.0763	92	0.0561	0.0628	142	0.1774	0.0957	192	0.0187	0.0572
43	0.0395	0.1054	93	0.0507	0.0285	143	0.2307	0.0743	193	0.1540	0.0358
44	0.0450	0.0914	94	0.0250	0.0272	144	0.2190	0.0678	194	0.1400	0.0374
45	0.0740	0.0706	95	0.0787	0.0581	145	0.1596	0.0645	195	0.1917	0.0447
46	0.0130	0.0621	96	0.0240	0.0595	146	0.1668	0.0663	196	0.2070	0.0652
47	0.0807	0.0823	97	0.0500	0.0474	147	0.0790	0.0376	197	0.0898	0.0735
48	0.0953	0.0726	98	0.0545	0.0723	148	0.0804	0.0668	198	0.2110	0.0674
49	0.1018	0.1959	99	0.0030	0.0512	149	0.1157	0.0306	199	0.2160	0.1347
50	0.0925	0.1131	100	0.0491	0.0713	150	0.1900	0.0662	200	0.1240	0.0460

Tabla A.3.3*Valores de AOD, Aqua y de AERONET usados en la validación (II).*

	Aqua	In situ		Aqua	In situ		Aqua	In situ		Aqua	In situ
201	0.1764	0.0595	251	0.0765	0.1184	301	0.0703	0.1373	351	0.1112	0.0643
202	0.0737	0.0478	252	0.1228	0.0696	302	0.2170	0.3238	352	0.1580	0.0786
203	0.1339	0.0852	253	0.1940	0.0644	303	0.0948	0.1204	353	0.0536	0.0933
204	0.1207	0.0796	254	0.1407	0.0344	304	0.0750	0.0921	354	0.1459	0.1216
205	0.1300	0.1378	255	0.1810	0.0287	305	0.3582	0.2737	355	0.0417	0.1232
206	0.0830	0.0528	256	0.1636	0.0320	306	0.1259	0.2241	356	0.0130	0.0947
207	0.2153	0.0814	257	0.3063	0.0595	307	0.4290	0.2589	357	0.0477	0.0780
208	0.0442	0.0362	258	0.0320	0.0542	308	0.1290	0.1859	358	0.0776	0.0847
209	0.0790	0.0561	259	0.0785	0.0554	309	0.1790	0.0878	359	0.2700	0.2295
210	0.0681	0.0672	260	0.0770	0.0456	310	0.0900	0.1383	360	0.1340	0.1216
211	0.0819	0.0649	261	0.0577	0.0340	311	0.0830	0.0634	361	0.1460	0.1695
212	0.0390	0.0628	262	0.2335	0.0407	312	0.0790	0.0722	362	0.1070	0.1787
213	0.1110	0.0588	263	0.2160	0.0920	313	0.1443	0.0973	363	0.0595	0.1584
214	0.1290	0.0656	264	0.0355	0.0365	314	0.0760	0.0924	364	0.1633	0.1119
215	0.0961	0.0673	265	0.2240	0.0751	315	0.1270	0.0519	365	0.0485	0.0593
216	0.1046	0.0541	266	0.1007	0.0497	316	0.2753	0.1558	366	0.1370	0.1473
217	0.0187	0.0645	267	0.0570	0.0420	317	0.2390	0.0609	367	0.1800	0.1472
218	0.0683	0.0429	268	0.1145	0.0256	318	0.0890	0.0486	368	0.1530	0.1508
219	0.0750	0.0562	269	0.0466	0.0254	319	0.0659	0.0684	369	0.0261	0.0531
220	0.0145	0.0341	270	0.0458	0.0287	320	0.1365	0.0563	370	0.0890	0.0355
221	0.0580	0.0378	271	0.0713	0.0438	321	0.3120	0.0344	371	0.0530	0.0687
222	0.0470	0.0367	272	0.0223	0.0846	322	0.2550	0.0399	372	0.1389	0.1038
223	0.0530	0.0214	273	0.1730	0.0940	323	0.1450	0.0373	373	0.0983	0.0674
224	0.0300	0.0230	274	0.0398	0.0339	324	0.0178	0.0369	374	0.4440	0.2646
225	0.0550	0.0659	275	0.0653	0.0747	325	0.0680	0.0404	375	0.2375	0.2011
226	0.1093	0.0354	276	0.0320	0.0424	326	0.0618	0.0405	376	0.1820	0.0449
227	0.0650	0.0414	277	0.0368	0.0481	327	0.0523	0.0519			
228	0.0380	0.0292	278	0.0425	0.0613	328	0.0820	0.0614			
229	0.0215	0.0378	279	0.0788	0.0632	329	0.0934	0.0586			
230	0.0848	0.0336	280	0.0315	0.0667	330	0.2120	0.0430			
231	0.0320	0.0556	281	0.0493	0.0430	331	0.1052	0.0277			
232	0.0480	0.0511	282	0.0333	0.0521	332	0.1188	0.0460			
233	0.0399	0.0458	283	0.0503	0.0626	333	0.0875	0.0573			
234	0.0220	0.0505	284	0.0310	0.0725	334	0.1367	0.0604			
235	0.0090	0.0476	285	0.0465	0.0569	335	0.0225	0.0755			
236	0.0384	0.0477	286	0.0578	0.0351	336	0.0350	0.0469			
237	0.0136	0.0488	287	0.0223	0.0567	337	0.0094	0.0427			
238	0.0483	0.0346	288	0.0362	0.0740	338	0.0241	0.0587			
239	0.0471	0.0347	289	0.0353	0.0620	339	0.0370	0.0682			
240	0.0620	0.0417	290	0.0350	0.1080	340	0.0320	0.0475			
241	0.0533	0.0257	291	0.0123	0.0677	341	0.0200	0.0505			
242	0.0523	0.1055	292	0.0097	0.0634	342	0.0424	0.0807			
243	0.0654	0.0501	293	0.0256	0.0583	343	0.0130	0.0554			
244	0.0940	0.1012	294	0.0205	0.0512	344	0.0282	0.0605			
245	0.0230	0.0960	295	0.0343	0.0647	345	0.0495	0.0734			
246	0.1265	0.0657	296	0.0990	0.0896	346	0.0607	0.0813			
247	0.1424	0.0545	297	0.0621	0.1190	347	0.0286	0.0576			
248	0.0907	0.0430	298	0.0600	0.0557	348	0.0300	0.0798			
249	0.0440	0.0788	299	0.0100	0.1208	349	0.0348	0.0994			
250	0.0421	0.0634	300	0.0804	0.1092	350	0.1010	0.1197			

Tabla A.3.4*Valores de AOD, Terra y de AERONET usados en la validación (I).*

	Terra	In situ		Terra	In situ		Terra	In situ		Terra	In situ
1	0.1380	0.0138	51	0.0704	0.0460	101	0.0662	0.0465	151	0.0077	0.0380
2	0.2480	0.0493	52	0.0160	0.0556	102	0.2310	0.0800	152	0.0580	0.0452
3	0.1805	0.0391	53	0.0420	0.0508	103	0.4370	0.1771	153	0.0323	0.0661
4	0.2295	0.0645	54	0.0286	0.0609	104	0.1390	0.0413	154	0.0824	0.0860
5	0.1687	0.0363	55	0.0187	0.0636	105	0.2270	0.0095	155	0.0903	0.0845
6	0.2023	0.0283	56	0.0710	0.0521	106	0.2255	0.0305	156	0.1473	0.0897
7	0.1323	0.0274	57	0.0511	0.0603	107	0.0849	0.0315	157	0.0316	0.0668
8	0.2540	0.0424	58	0.0350	0.0780	108	0.0774	0.0416	158	0.0980	0.0846
9	0.0780	0.0341	59	0.1178	0.1156	109	0.0884	0.0315	159	0.0140	0.0427
10	0.1131	0.0505	60	0.0543	0.1119	110	0.1365	0.0283	160	0.0030	0.0339
11	0.1975	0.0444	61	0.1270	0.1124	111	0.3220	0.0645	161	0.0970	0.0340
12	0.1250	0.0368	62	0.1010	0.1251	112	0.0760	0.0298	162	0.0050	0.0690
13	0.1083	0.0273	63	0.1069	0.1133	113	0.2059	0.0343	163	0.0247	0.0696
14	0.1051	0.0316	64	0.1140	0.0870	114	0.0764	0.0138	164	0.0656	0.0676
15	0.1870	0.0356	65	0.0850	0.0815	115	0.0243	0.0303	165	0.0154	0.0387
16	0.0933	0.0690	66	0.0253	0.0667	116	0.0523	0.0305	166	0.0388	0.0635
17	0.0750	0.0367	67	0.0120	0.1119	117	0.0319	0.0362	167	0.0160	0.0704
18	0.1229	0.0292	68	0.1287	0.1000	118	0.0663	0.0531	168	0.0751	0.0886
19	0.1523	0.0488	69	0.2220	0.2046	119	0.0706	0.0438	169	0.0110	0.0711
20	0.2258	0.0961	70	0.1550	0.1572	120	0.0213	0.0329	170	0.0253	0.0784
21	0.2308	0.0660	71	0.0208	0.0675	121	0.0240	0.0425	171	0.1077	0.1143
22	0.0450	0.0501	72	0.0384	0.1270	122	0.1000	0.0560	172	0.1918	0.2032
23	0.0438	0.0373	73	0.1970	0.0984	123	0.0850	0.0455	173	0.2920	0.2568
24	0.0750	0.0472	74	0.0183	0.0606	124	0.2182	0.1400	174	0.1170	0.1713
25	0.0956	0.0654	75	0.1692	0.1184	125	0.1967	0.1419	175	0.0460	0.1447
26	0.1463	0.0843	76	0.2470	0.0678	126	0.0911	0.0370	176	0.1364	0.1456
27	0.1348	0.0871	77	0.0455	0.0471	127	0.1367	0.0444	177	0.0960	0.1718
28	0.0471	0.0574	78	0.1280	0.0650	128	0.0860	0.0197	178	0.1759	0.2063
29	0.0645	0.0307	79	0.1030	0.0591	129	0.1760	0.0513	179	0.0320	0.0857
30	0.1075	0.0382	80	0.1462	0.2162	130	0.0657	0.0430	180	0.0803	0.0906
31	0.0697	0.0331	81	0.0040	0.1470	131	0.0887	0.0530	181	0.0620	0.0507
32	0.1350	0.0222	82	0.1630	0.0891	132	0.1363	0.0922	182	0.0129	0.0469
33	0.0263	0.0349	83	0.2530	0.0684	133	0.0605	0.0485	183	0.0117	0.0847
34	0.0285	0.0770	84	0.3090	0.0874	134	0.1107	0.0428	184	0.1090	0.1909
35	0.1643	0.0890	85	0.0693	0.0311	135	0.0803	0.0414	185	0.0113	0.0569
36	0.0607	0.0725	86	0.0570	0.0412	136	0.0390	0.0327	186	0.0430	0.0987
37	0.0983	0.0762	87	0.1230	0.0354	137	0.0486	0.0352	187	0.0430	0.0615
38	0.0473	0.0403	88	0.0010	0.0309	138	0.1377	0.0950	188	0.1290	0.1768
39	0.0890	0.0648	89	0.1683	0.1414	139	0.0203	0.0445	189	0.2093	0.0755
40	0.0437	0.0636	90	0.0861	0.0252	140	0.0822	0.0682	190	0.1102	0.1044
41	0.0530	0.0525	91	0.0060	0.0321	141	0.0312	0.0624	191	0.1277	0.1768
42	0.0120	0.0514	92	0.0620	0.0124	142	0.0542	0.0558	192	0.0347	0.1291
43	0.0647	0.0601	93	0.1278	0.0228	143	0.0520	0.0553	193	0.0750	0.0470
44	0.0520	0.0666	94	0.0880	0.0156	144	0.0490	0.0657	194	0.1267	0.0326
45	0.0623	0.0675	95	0.0365	0.0362	145	0.0505	0.0764	195	0.1025	0.0517
46	0.0856	0.0972	96	0.1513	0.1024	146	0.1470	0.0775	196	0.1450	0.0638
47	0.0769	0.0953	97	0.0530	0.0316	147	0.1420	0.0677	197	0.1213	0.0372
48	0.1231	0.0729	98	0.1793	0.0172	148	0.0988	0.0301	198	0.0400	0.0612
49	0.0492	0.0472	99	0.0570	0.0461	149	0.1034	0.0403	199	0.0416	0.0610
50	0.0850	0.0440	100	0.0325	0.0278	150	0.0530	0.0326	200	0.0138	0.0819

Tabla A.3.5*Valores de AOD, Terra y de AERONET usados en la validación (II)*

	Terra	In situ		Terra	In situ		Terra	In situ		Terra	In situ
201	0.1190	0.1120	251	0.0517	0.0730	301	0.2046	0.1185	351	0.0120	0.0339
202	0.0640	0.0556	252	0.0436	0.0954	302	0.2990	0.0564	352	0.1060	0.0391
203	0.0690	0.0547	253	0.0730	0.0523	303	0.1360	0.0435	353	0.0975	0.0211
204	0.0677	0.0645	254	0.0470	0.0746	304	0.0405	0.0500	354	0.0140	0.0519
205	0.1665	0.0419	255	0.0470	0.0623	305	0.1960	0.0582	355	0.0785	0.0551
206	0.2777	0.0492	256	0.0385	0.0692	306	0.0690	0.0447	356	0.0530	0.0806
207	0.1403	0.0508	257	0.0344	0.0822	307	0.1507	0.0386	357	0.0190	0.0352
208	0.1816	0.1036	258	0.0675	0.0786	308	0.1427	0.0503	358	0.0910	0.0547
209	0.1305	0.0389	259	0.0390	0.0572	309	0.0749	0.0725	359	0.0180	0.0446
210	0.2732	0.1502	260	0.0430	0.1038	310	0.0880	0.0623	360	0.0230	0.0814
211	0.0697	0.0392	261	0.0492	0.0822	311	0.1111	0.0532	361	0.2690	0.2429
212	0.1482	0.0564	262	0.0439	0.0973	312	0.1029	0.0583	362	0.3560	0.2238
213	0.1498	0.0713	263	0.0297	0.1020	313	0.1277	0.0961	363	0.3480	0.1749
214	0.0807	0.0384	264	0.1870	0.2029	314	0.1745	0.0952	364	0.0953	0.0633
215	0.1233	0.0344	265	0.1188	0.1365	315	0.0724	0.0781	365	0.0820	0.0788
216	0.1485	0.0379	266	0.0450	0.0692	316	0.0728	0.0638	366	0.0337	0.0366
217	0.2450	0.0395	267	0.0110	0.0413	317	0.0456	0.0624	367	0.0423	0.0437
218	0.1863	0.0708	268	0.0090	0.1049	318	0.0416	0.0469	368	0.0838	0.1025
219	0.3790	0.0843	269	0.1555	0.1459	319	0.0506	0.0472	369	0.2050	0.1245
220	0.0873	0.0730	270	0.0760	0.0924	320	0.1280	0.0624	370	0.5673	0.2130
221	0.1170	0.0482	271	0.0359	0.0819	321	0.0373	0.0492	371	0.0343	0.0794
222	0.1209	0.0907	272	0.0480	0.0905	322	0.0342	0.0440	372	0.0363	0.0844
223	0.1715	0.0525	273	0.1013	0.0952	323	0.0358	0.0506	373	0.0102	0.0790
224	0.0427	0.0317	274	0.0550	0.0597	324	0.0437	0.0517	374	0.0443	0.0396
225	0.1350	0.0367	275	0.0173	0.1031	325	0.0173	0.0195	375	0.1870	0.1211
226	0.1170	0.1043	276	0.0293	0.0912	326	0.0680	0.0267	376	0.2540	0.0308
227	0.0593	0.1053	277	0.0370	0.1223	327	0.0450	0.0275	377	0.1770	0.0222
228	0.0600	0.0553	278	0.0948	0.0738	328	0.1370	0.0840	378	0.1660	0.0354
229	0.0903	0.0658	279	0.3015	0.1766	329	0.0905	0.0213	379	0.0270	0.0348
230	0.0812	0.0561	280	0.0090	0.0666	330	0.0528	0.0217	380	0.0277	0.0501
231	0.0740	0.0599	281	0.1438	0.0903	331	0.0183	0.0275	381	0.1203	0.0600
232	0.0390	0.1053	282	0.1810	0.0653	332	0.0157	0.0381	382	0.0076	0.0354
233	0.1000	0.0854	283	0.1003	0.0687	333	0.0335	0.0276	383	0.1847	0.0537
234	0.0590	0.0496	284	0.1407	0.0616	334	0.0740	0.0453	384	0.1170	0.0425
235	0.1824	0.1514	285	0.1170	0.0460	335	0.0270	0.0448	385	0.2783	0.0663
236	0.1470	0.0835	286	0.3130	0.0506	336	0.0987	0.0456	386	0.1940	0.0553
237	0.0243	0.0346	287	0.0414	0.0238	337	0.0196	0.0297	387	0.1721	0.0338
238	0.0716	0.0522	288	0.1200	0.0599	338	0.0690	0.0455	388	0.1597	0.0399
239	0.0161	0.0558	289	0.0490	0.0425	339	0.0255	0.0430	389	0.0935	0.0407
240	0.0656	0.0732	290	0.3890	0.0793	340	0.0275	0.0560	390	0.2085	0.0969
241	0.1330	0.0557	291	0.0778	0.0347	341	0.0580	0.0506	391	0.0957	0.0376
242	0.1537	0.0577	292	0.1890	0.0672	342	0.0248	0.0591	392	0.1615	0.0350
243	0.0410	0.0531	293	0.1133	0.0417	343	0.0750	0.0546	393	0.0437	0.0406
244	0.0743	0.0600	294	0.1363	0.0675	344	0.0410	0.0322	394	0.1230	0.0679
245	0.0370	0.0593	295	0.1156	0.0168	345	0.0580	0.0455	395	0.0537	0.0509
246	0.0790	0.0635	296	0.1292	0.0518	346	0.0440	0.0453	396	0.0101	0.0526
247	0.0343	0.0460	297	0.0676	0.0274	347	0.0340	0.0706	397	0.0853	0.0828
248	0.0252	0.0652	298	0.1312	0.0343	348	0.0085	0.0572	398	0.0548	0.0430
249	0.0475	0.0590	299	0.0583	0.0702	349	0.0070	0.0479	399	0.0711	0.0546
250	0.0265	0.0659	300	0.1835	0.0961	350	0.0367	0.0591	400	0.0864	0.0799

Tabla A.3.6

Valores de AOD, Terra y de AERONET usados en la validación (III)

	Terra	In situ		Terra	In situ		Terra	In situ			
401	0.0807	0.0774	451	0.0160	0.0956	501	0.0595	0.0560			
402	0.0830	0.0740	452	0.0628	0.1770	502	0.0230	0.0849			
403	0.0974	0.0581	453	0.1810	0.1010	503	0.0814	0.0675			
404	0.0791	0.0881	454	0.1477	0.1030	504	0.0225	0.0791			
405	0.1124	0.1019	455	0.0300	0.0413	505	0.0273	0.0902			
406	0.0395	0.0695	456	0.0220	0.1046	506	0.0570	0.0737			
407	0.1479	0.0412	457	0.0220	0.0443	507	0.0020	0.0864			
408	0.0427	0.0601	458	0.0970	0.0813	508	0.0190	0.0830			
409	0.0506	0.0487	459	0.0660	0.0542	509	0.0250	0.0778			
410	0.0712	0.0705	460	0.1768	0.0288	510	0.0587	0.0823			
411	0.0185	0.0453	461	0.0800	0.0664	511	0.0625	0.0896			
412	0.0485	0.0575	462	0.0226	0.0422	512	0.1233	0.0901			
413	0.0567	0.0649	463	0.1231	0.0451	513	0.0050	0.0612			
414	0.0449	0.0593	464	0.0060	0.0540	514	0.0240	0.0762			
415	0.1016	0.0778	465	0.1430	0.0290	515	0.0430	0.0663			
416	0.0463	0.0403	466	0.1553	0.0532	516	0.0945	0.0858			
417	0.0508	0.0580	467	0.0760	0.0830	517	0.0150	0.0950			
418	0.0260	0.0342	468	0.0665	0.0714	518	0.1320	0.1466			
419	0.0156	0.0419	469	0.2595	0.0800	519	0.0240	0.0905			
420	0.0550	0.0747	470	0.0581	0.0388	520	0.1023	0.1157			
421	0.0810	0.0970	471	0.1710	0.0479	521	0.0360	0.0738			
422	0.0454	0.0337	472	0.2690	0.0568	522	0.0800	0.1154			
423	0.0117	0.0431	473	0.0135	0.0377	523	0.0690	0.1709			
424	0.0110	0.0636	474	0.0760	0.0298	524	0.0417	0.0601			
425	0.0517	0.0623	475	0.0953	0.0411	525	0.0781	0.1106			
426	0.1210	0.0788	476	0.0487	0.0594	526	0.0343	0.0786			
427	0.0316	0.0421	477	0.1173	0.0310	527	0.0265	0.1152			
428	0.0162	0.0474	478	0.0479	0.0430	528	0.1540	0.2284			
429	0.0520	0.1132	479	0.0930	0.0574	529	0.1866	0.2150			
430	0.0914	0.1089	480	0.0499	0.0612	530	0.2190	0.1989			
431	0.0914	0.1159	481	0.3630	0.0257	531	0.0870	0.1235			
432	0.0320	0.0425	482	0.1937	0.0292	532	0.0559	0.1262			
433	0.0870	0.0721	483	0.0800	0.0601	533	0.0517	0.1064			
434	0.0160	0.0540	484	0.2380	0.0680	534	0.0558	0.1404			
435	0.0228	0.0651	485	0.1010	0.0616	535	0.0440	0.1486			
436	0.0140	0.0637	486	0.0640	0.0490	536	0.0880	0.0829			
437	0.0207	0.0796	487	0.1046	0.0317	537	0.1010	0.0895			
438	0.0850	0.1209	488	0.0611	0.0472	538	0.2530	0.3343			
439	0.0300	0.1029	489	0.1320	0.0449	539	0.0107	0.0993			
440	0.3794	0.3080	490	0.1765	0.0615	540	0.1827	0.1868			
441	0.0583	0.1210	491	0.1178	0.0758	541	0.0152	0.0390			
442	0.0623	0.1710	492	0.1091	0.0482						
443	0.0244	0.0759	493	0.0430	0.0610						
444	0.1073	0.1662	494	0.0245	0.0701						
445	0.3124	0.3282	495	0.0266	0.0495						
446	0.0340	0.1222	496	0.0776	0.0815						
447	0.0895	0.1796	497	0.0270	0.0662						
448	0.0740	0.2011	498	0.1180	0.1109						
449	0.1864	0.2305	499	0.0817	0.0929						
450	0.1475	0.1629	500	0.0243	0.0541						

VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOLE UTILIZANDO IMÁGENES DEL SENSOR MODIS, REGIÓN DE AYACUCHO, PERIODO 2003- 2019

por Alfredo Gamboa Mendoza

Fecha de entrega: 25-ene-2022 11:27p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 1748353829

Nombre del archivo: Tesis_ALFREDO_GAMBOA_MENDOZA_FISMA.pdf (7.85M)

Total de palabras: 29241

Total de caracteres: 140235

VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOLES UTILIZANDO IMÁGENES DEL SENSOR MODIS, REGIÓN DE AYACUCHO, PERIODO 2003-2019

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

19%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

hdl.handle.net

Fuente de Internet

3%

2

cybertesis.unmsm.edu.pe

Fuente de Internet

3%

3

ateneo.unmsm.edu.pe

Fuente de Internet

1%

4

www.clubensayos.com

Fuente de Internet

1%

5

www.javeriana.edu.co

Fuente de Internet

1%

6

repositorio.unsch.edu.pe

Fuente de Internet

1%

7

www.scribd.com

Fuente de Internet

1%

8

1library.co

Fuente de Internet

1%

9	docplayer.es Fuente de Internet	1 %
10	www.ciga.unam.mx Fuente de Internet	1 %
11	www.pinterest.es Fuente de Internet	1 %
12	repositorio.espe.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
13	doku.pub Fuente de Internet	<1 %
14	Submitted to Escuela Politecnica Nacional Trabajo del estudiante	<1 %
15	repositorio.unprg.edu.pe:8080 Fuente de Internet	<1 %
16	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1 %
17	oa.upm.es Fuente de Internet	<1 %
18	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
19	repositorio.undac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
20	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1 %

21	Natacha Soledad Represa, Jesus Palomar Vazquez, Andres Atilio Port, Alfonso Fernandez Sarria. "Study of the monthly correlation between AOD obtained from MODIS images and particulate matter for a coastal city", 2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), 2018 Publicación	<1 %
----	---	------

22	www.culturamas.es Fuente de Internet	<1 %
----	--	------

23	Submitted to Atlantic International University Trabajo del estudiante	<1 %
----	--	------

24	ig.conae.unc.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
----	--	------

25	studylib.es Fuente de Internet	<1 %
----	--	------

26	repositorio.aemet.es Fuente de Internet	<1 %
----	--	------

27	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
----	--	------

28	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
----	--	------

29	repositorio.igp.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
----	--	------

30	repositorio.ufrn.br:8080 Fuente de Internet	<1 %
----	--	------

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo