

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**TESIS**

**“ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SATELITAL PARA EL ESTUDIO DE  
LA CALIDAD DEL AIRE: CASO DE ESTUDIO LIMA, PERÚ”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**ELABORADO POR:**

**HAROLD AMÉRICO OROPEZA TELLO**

**ASESOR:**

**Mag. CESAR MANUEL SEBASTIAN DIEZ CHIRINOS**

**LIMA - PERÚ**

**2022**

## **DEDICATORIA**

“Esta tesis está dedicada a:

A ustedes Emilia y Americo quienes son los motores de que siga esforzándome día a día, y gracias a su amor, esfuerzo y sacrificio me han permitido cumplir esta significativa meta.

A mi hermana Katherine quien con su apoyo en todo este tiempo me permite cumplir este gran sueño.

Y a Maia, quien se convirtió en uno de mis motores desde que partiste.”

## **AGRADECIMIENTOS**

“Mi profundo agradecimiento a la Dra. Johana Margarita Carmona García principal colaborador durante todo el proceso, quien con su conocimiento y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

De igual manera, mis agradecimientos a la Universidad Nacional de Ingeniería, a toda la Facultad de Ingeniería Ambiental, a mis profesores quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional.”

## RESUMEN

En las últimas décadas, la ciudad de Lima ha incrementado su nivel de contaminación ambiental con el desarrollo humano, con una concentración media anual de  $28.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respecto al Material Particulado menor a 2.5 micras ( $PM_{2.5}$ , desde ahora) para el 2018, posicionándola como la octava ciudad más contaminada de Latinoamérica y en el puesto 22 a nivel mundial.

En la presente investigación se evalúa información satelital para el estudio de datos obtenidos de calidad de aire incorporando condiciones climáticas en la provincia de Lima, Perú. Las fuentes de información satelital fueron obtenidas del sensor Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS, desde ahora) a bordo del satélite Suomi NPP; y del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS, desde ahora) a bordo de los satélites AQUA y TERRA. Otra fuente de información fue la del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, desde ahora), la cual cuenta con diez estaciones repartidas en los distritos de la provincia de Lima y de donde se obtuvieron datos de calidad de aire. Las mencionadas estaciones cuentan con instrumentos de medición automáticos de meteorología (presión, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) y calidad de aire, cuyos datos fueron incluidos y proyectados sobre data de clima en el presente estudio para evaluar si presentan alguna tendencia similar con las tendencias evaluadas para los datos de productos satelitales. Se estableció el análisis de los datos de Material Particulado que son menores que 10 micras ( $PM_{10}$ , desde ahora),  $PM_{2.5}$ , Temperatura, Humedad Relativa y Velocidad del Viento de las estaciones de calidad de aire; así mismo, para el caso de los productos satelitales se analizó los datos de Aerosol Optical Depth (AOD, desde ahora) obtenidos a partir de algoritmos de los diferentes instrumentos a bordo de los satélites mencionados.

Finalmente, para conocer rangos en las distintas estaciones de calidad de aire, se determinó valores extremos de Material Particulado (PM, de sus siglas en inglés) para los dominios a los cuales se le aplican los métodos estadísticos. Esta elaboración de gráficos de máximos y mínimos se realiza para saber si los datos de calidad de aire se encuentran en un rango establecido, o si es que existe algún rango que está fuera de lo normal y el cual pueda ser debido a condiciones climáticas especiales, falta de mantenimiento en las estaciones u otro factor. Así mismo, se realizaron análisis de las tendencias en los mejores dominios encontrados que presentan las bases de datos, tanto de los datos obtenidos de satélites y de datos obtenidos de las estaciones de calidad de aire, aplicando los métodos estadísticos de Pendiente de Sen y Test de Mann Kendall. También se aplicó la Función de Densidad de Probabilidad (PDF, de sus siglas en inglés) a los dominios amplios de las bases de datos obtenidos para identificar regiones de mayores y menores probabilidades para valores de una variable; así como se realizó la proyección de información satelital respecto a las variables de clima, para conocer la curva correspondiente a cada parámetro.

## ABSTRACT

In recent decades, the city of Lima has increased its level of environmental pollution with human development, with an average annual concentration of  $28.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  with respect to Particulate Matter less than 2.5 microns ( $PM_{2.5}$ , as of now) for 2018, positioning it as the eighth most polluted city in Latin America and 22nd worldwide.

In the present investigation, satellite information is evaluated for the study of air quality data obtained incorporating climatic conditions in the province of Lima, Peru. The sources of satellite information were obtained from the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS, from now on) sensor on board the Suomi NPP satellite; and from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS, from now on) sensor on board the AQUA and TERRA satellites. Another source of information was the National Service of Meteorology and Hydrology of Peru (SENAMHI, from now on), which has ten stations distributed in the districts of the province of Lima and from which air quality data were obtained. These stations have automatic measuring instruments for meteorology (pressure, relative humidity, wind speed and direction) and air quality, whose data were included and projected on climate data in the present study to evaluate if they present any similar trend with the trends evaluated for satellite product data. The analysis of Particulate Matter data that are smaller than 10 microns ( $PM_{10}$ ),  $PM_{2.5}$ , Temperature, Relative Humidity and Wind Speed from the air quality stations was established; likewise, for the case of satellite products, the Aerosol Optical Depth (AOD, from now on) data obtained from algorithms of the different instruments on board the mentioned satellites were analyzed.

Finally, in order to know ranges in the different air quality stations, extreme values of Particulate Matter (PM) were determined for the domains to which the statistical methods are applied. This elaboration of maximum and minimum graphs is done to know if the air quality data are in an established range, or if there is any range that is out of the normal and which may be due to special weather conditions, lack of maintenance at the stations or any other factor. Likewise, trend analysis was performed on the best domains found in the databases, both from satellite data and data obtained from the air quality stations, applying the statistical methods of Sen's Slope and Mann Kendall Test. The Probability Density Function (PDF) was also applied to the broad domains of the databases obtained to identify regions of higher and lower probabilities for values of a variable, as well as the projection of satellite information with respect to climate variables, in order to know the curve corresponding to each parameter.

## ÍNDICE

<b>1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
1.0. Antecedentes y revisión del estado del arte	13
1.1. Planteamiento del problema	16
1.2. Justificación	17
1.3. Objetivos	18
1.3.1. Objetivo General	18
1.3.2. Objetivos específicos	18
1.4. Hipótesis	18
1.4.1. Hipótesis general	18
1.5. Contexto de la investigación	18
1.6. Definición de variables	21
1.6.1. Variable dependiente	21
1.6.2. Variables independientes	21
1.7. Alcances y limitaciones del estudio	21
<b>2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b>	<b>23</b>
2.0. Profundidad Óptica de Aerosol (AOD)	23
2.1. Sensores satelitales	23
2.1.1. Sensores pasivos	24
2.1.2. Sensores activos	24
2.2. Instrumento Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)	24
2.3. Transferencia radiativa	24
2.3.1. Radiación	25
2.3.2. Absorción	25
2.3.3. Dispersión	25
2.3.4. Extinción	25
2.4. Satélites	25
2.4.1. Satélite Aqua	25
2.4.2. Satélite Terra	26
2.4.3. Satélite Suomi NPP	27
2.5. Resolución espectral en sensores remotos	27
2.6. Resolución espacial en sensores remotos	28
2.7. Resolución temporal en sensores remotos	28

2.8.	Resolución radiométrica en sensores remotos	29
3.	<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA</b>	30
3.0.	Métodos	30
3.1.	Datos	31
3.1.1.	Información de productos satelitales	31
3.1.2.	Datos observados de calidad del aire	39
3.2.	Representatividad temporal y espacial	43
3.3.	Integración de información satelital y base de datos observados en tierra	45
3.4.	Análisis estadístico de bases de datos integradas	46
4.	<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS</b>	48
4.1	Representatividad temporal y espacial	48
4.2	Síntesis de la información de datos satelitales y datos observados de calidad de aire y meteorología	66
4.3	Análisis estadístico de datos integrados de productos satelitales y observados de calidad de aire y meteorología	70
5	<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES</b>	92
6.	<b>CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES</b>	97
7.	<b>CAPÍTULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	98
8.	<b>CAPÍTULO VIII: APÉNDICE</b>	103

## Índice de tablas

<b>Tabla N°01.</b> Distritos de Lima provincia.....	20
<b>Tabla N°02.</b> Coordenadas de la provincia de Lima .....	20
<b>Tabla N°03.</b> Detalles de las estaciones de calidad de aire en la provincia de Lima .....	40
<b>Tabla N°04.</b> Ejemplo de parámetros y concentraciones de la estación de calidad de aire "Carabayllo" .....	41
<b>Tabla N°05.</b> Técnicas, métodos y registros de los parámetros de calidad de aire, ejemplo en la estación "Carabayllo" .....	41
<b>Tabla N°06.</b> Técnicas, métodos y registros de los parámetros meteorológicos, ejemplo en la estación "Carabayllo" .....	42
<b>Tabla N°07.</b> Integración de datos de AOD y datos observados para el <b>Dominio N°1</b> <b>(25kmx25km)</b> .....	66
<b>Tabla N°08.</b> Integración de datos de AOD y datos observados para el <b>Dominio N°2</b> <b>(25kmx25km)</b> .....	67
<b>Tabla N°09.</b> Integración de datos de AOD y datos observados para el <b>Dominio N°03</b> <b>(50kmx50km)</b> .....	67
<b>Tabla N°10.</b> Resumen de porcentaje de disponibilidad de datos para los parámetros de AOD - 1kmx1km, 3kmx3km y 10kmx10km VS Datos en tierra para el periodo 2015 – 2019 .....	68
<b>Tabla N°11.</b> Porcentaje de disponibilidad de datos para los parámetros de AQUA y TERRA Dark Target 10K - 25kmx25km y 50kmx50km VS Datos en tierra para el periodo 2015 – 2019.....	68
<b>Tabla N°12.</b> Porcentaje de disponibilidad de datos para los parámetros de AQUA y TERRA Deep Blue 10K - 25kmx25km y 50kmx50km VS Datos en tierra para el periodo 2015 – 2019.....	69
<b>Tabla N°13.</b> Porcentaje de disponibilidad de datos para los parámetros de VIIRS Deep Blue y Dark Target - 25kmx25km y 50kmx50km VS Datos en tierra para el periodo 2015 – 2019 .....	69
<b>Tabla N°14.</b> Tendencias para datos de parámetros de AOD VS Datos en tierra en el <b>Dominio</b> <b>N°01 (25kmx25km)</b> para el periodo 2015 – 2019. ....	83
<b>Tabla N°15.</b> Tendencias para datos de parámetros de AOD VS Datos en tierra en el <b>Dominio</b> <b>N°02 (25kmx25km)</b> para el periodo 2015 – 2019. ....	84
<b>Tabla N°16.</b> Tendencias para datos de parámetros de AOD VS Datos en tierra en el <b>Dominio</b> <b>"50kmx50km"</b> para el periodo 2015 – 2019.....	84
<b>Tabla N°17.</b> Tendencias de parámetros de AOD en los Dominios N°01, N°02 y 50kmx50km para el periodo 2015 – 2019 .....	85
<b>Tabla N°18.</b> Porcentaje de tendencia de <i>PM</i> 10 y <i>PM</i> 2.5 <b>agrupando los tres dominios</b> para algoritmos en el periodo 2015 – 2019 .....	86

<b>Tabla N°19.</b> Porcentaje de tendencia de <i>PM10</i> y <i>PM2.5</i> para los dominios N°01, N°02 y “50kmx50km” en el periodo 2015 – 2019.....	86
<b>Tabla N°20.</b> Porcentaje de tendencia de <i>PM10</i> y <i>PM2.5</i> para los Dominios N°01, N°02 y “50kmx50km” y por algoritmo Deep Blue y Dark Target, en el periodo 2015 – 2019. ....	87
<b>Tabla N°21.</b> Tendencias para datos de parámetros de AOD VS Datos en tierra en el Dominio N°01 (25kmx25km) para el periodo 2015 – 2019.....	87
<b>Tabla N°22.</b> Tendencias para datos de parámetros de AOD VS Datos en tierra en el Dominio N°02 (25kmx25km) para el periodo 2015 – 2019.....	88
<b>Tabla N°23.</b> Tendencias para datos de parámetros de AOD VS Datos en tierra en el Dominio “50kmx50km” para el periodo 2015 – 2019.....	89
<b>Tabla N°24.</b> Tendencias de parámetros de AOD en los Dominios N°01, N°02 y 50kmx50km para el periodo 2015 – 2019 .....	89
<b>Tabla N°25.</b> Porcentaje de tendencia de <i>PM10</i> y <i>PM2.5</i> agrupando los tres dominios para algoritmos en el periodo 2015 – 2019 .....	90
<b>Tabla N°26.</b> Porcentaje de tendencia de <i>PM10</i> y <i>PM2.5</i> para los dominios N°01, N°02 y “50kmx50km” en el periodo 2015 – 2019 .....	90
<b>Tabla N°27.</b> Porcentaje de tendencia de <i>PM10</i> y <i>PM2.5</i> para los Dominios N°01, N°02 y “50kmx50km” y por algoritmo Deep Blue y Dark Target, en el periodo 2015 – 2019. ....	91

## Índice de figuras

Figura N°01: Mapa de la provincia de Lima. ....	19
Figura N°02: Clasificación de sensores satelitales según su origen. ....	24
Figura N°03: Satélite AQUA.....	26
Figura N°04: Instrumentos a bordo del Satélite TERRA. ....	26
Figura N°05: Satélite Suomi NPP junto a sus instrumentos. ....	27
Figura N°06: Representación de la resolución espectral en banda azul, verde y rojo.....	28
Figura N°07: Representación de tamaño de pixel de 30, 60 y 90 metros.....	28
Figura N°08. Representación de la frecuencia del paso de un satélite.....	29
Figura N°09: Diagrama general de metodología.....	30
Figura N°10: Interfaz de base de datos EARTHDATA SEARCH.....	32
Figura N°11: Listado resumen de los archivos “HDF” en EARTHDATA SEARCH.....	33
Figura N°12: Almacenamiento de archivos “HDF” en la base de datos local. ....	34
Figura N°13: Visualizador de SDS’s y datos en Panoply.....	34
Figura N°14: Descripción del contenido en el “fileList.txt”.....	35
Figura N°15: Requisitos de archivos para correr el script de Python “py”.....	35
Figura N°16: Contenido del script para convertir de HDF a txt.....	36
Figura N°17: Archivos “txt” generados al finalizar la ejecución del script de extensión “py”. ...	37
Figura N°18: Contenido del script para filtrar los datos obtenidos. ....	38
Figura N°19: Ejemplo de datos filtrados por fecha, AOD y Quality Flag. ....	39
Figura N°20. Estaciones de calidad de aire en la provincia de Lima. ....	40
Figura N°21: Buffer de 1kmx1km, 3kmx3km, 10kmx10km, 25kmxkm y 50kmx50km en las estaciones del SENAMHI”.....	44
Figura N°22: Promedio diario de MP representados para el dominio 01 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) <i>PM</i> 10 y b) <i>PM</i> 2.5.....	48
Figura N°23: Promedio diario de parámetros representados para el dominio 01 en Lima, obtenidos de SENAMHI: a) Temperatura y b) Humedad Relativa. ....	49
Figura N°24: Promedio diario de parámetros representados para el dominio 01 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) Precipitación y b) Velocidad de Viento. ....	49
Figura N°25: Promedio diario de MP representados para el dominio 02 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) <i>PM</i> 10 y b) <i>PM</i> 2.5.....	50
Figura N°26: Promedio diario de parámetros representados para el dominio N° 02 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) Temperatura y b) Humedad Relativa.....	51

Figura N°27: Promedio diario de parámetros representados para el dominio N° 02 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) Precipitación y b) Velocidad de Viento. ....	51
Figura N°28: Promedio diario de MP representados para el dominio “50kmx50km” en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) <i>PM</i> 10 y b) <i>PM</i> 2.5. ....	52
Figura N°29: Promedio diario de parámetros representados para el dominio “50kmx50km” en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) Temperatura y b) Humedad Relativa. ....	53
Figura N°30: Promedio diario de parámetros representados para el dominio “50kmx50km” en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) Precipitación y b) Velocidad de Viento.....	53
Figura N°31: Promedio diario de AOD representados para el algoritmo Deep Blue – Dominio 01 en Lima Metropolitana, obtenidos de MODIS y VIIRS: .....	54
Figura N°32: Promedio diario de AOD representados .....	55
Figura N°33: Promedio diario de AOD representados para el algoritmo Deep Blue – Dominio 02 en Lima Metropolitana: a) AOD AQUA Deep Blue Dominio 02, b) AOD TERRA Deep Blue Dominio 02 y c) AOD VIIRS Deep Blue Dominio 02. ....	56
Figura N°34: Promedio diario de AOD representados para el algoritmo Dark Target – Dominio 02 en Lima Metropolitana, obtenidos de MODIS y VIIRS: a) AOD AQUA Dark Target Dominio 02, b) AOD TERRA Dark Target Dominio 02 y c) AOD VIIRS Dark Target Dominio 02. ....	57
Figura N°35: Promedio diario de AOD representados para el algoritmo Deep Blue – Dominio 03 en Lima Metropolitana, obtenidos de MODIS y VIIRS: a) AOD AQUA Deep Blue Dominio 03, b) AOD TERRA Deep Blue Dominio 03 y c) AOD VIIRS Deep Blue Dominio 03.....	58
Figura N°36: Promedio diario de AOD representados para el algoritmo Dark Target – Dominio 03 en Lima Metropolitana, obtenidos de MODIS y VIIRS: a) AOD AQUA Dark Target Dominio 03, b) AOD TERRA Dark Target Dominio 03 y c) AOD VIIRS Dark Target Dominio 03. ....	59
Figura N°37: Representación espacial de AOD representados para el dominio 01 en Lima Metropolitana. a) AOD – AQUA Deep Blue Dominio 01, b) AOD – AQUA Dark Tarjet Dominio 01, c) AOD – TERRA Deep Blue Dominio 01, d) AOD – TERRA Dark Tarjet Dominio 01, e) AOD – SUOMI NPP Deep Blue Dominio 01 y f) AOD – SUOMI NPP Dark Tarjet Dominio 01. ....	61
Figura N°38: Representación espacial de AOD representados para el dominio 02 en Lima Metropolitana. a) AOD – AQUA Deep Blue Dominio 02, b) AOD – AQUA Dark Tarjet Dominio 02, c) AOD – TERRA Deep Blue Dominio 02, d) AOD – TERRA Dark Tarjet Dominio 02, e) AOD – SUOMI NPP Deep Blue Dominio 02 y f) AOD – SUOMI NPP Dark Tarjet Dominio 02. ....	63
Figura N°39: Representación espacial de AOD representados para el dominio “50kmx50km” en Lima Metropolitana. a) AOD – AQUA Deep Blue Dominio 02, b) AOD – AQUA Dark Tarjet Dominio 02, c) AOD – TERRA Deep Blue Dominio 02, d) AOD – TERRA Dark Tarjet Dominio 02, e) AOD – SUOMI NPP Deep Blue Dominio 02 y f) AOD – SUOMI NPP Dark Tarjet Dominio 02..	65

Figura N°40: Valores Extremos de parámetros de calidad de aire del Dominio N°03 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) <i>PM</i> 10 y b) <i>PM</i> 2.5 .....	70
Figura N°41: Valores Extremos de parámetros de temperatura y humedad relativa del Dominio N°03 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) Temperatura y b) Humedad Relativa. ....	71
Figura N°42: Valores Extremos de parámetros de Precipitación y Velocidad de Viento en el Dominio N°03 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) Precipitación y b) Velocidad de Viento. ....	71
Figura N°43: Valores Extremos de parámetros de AOD Dark Target en el Dominio N°03 en Lima Metropolitana, obtenidos de MODIS y VIIRS: a) AOD AQUA Dark Target Dominio 03, b) AOD TERRA Dark Target Dominio 03 y c) AOD VIIRS Dark Target Dominio 03. ....	72
Figura N°44: Valores Extremos de parámetros de AOD Deep Blue en el Dominio N°03 en Lima Metropolitana, obtenidos de MODIS y VIIRS: a) AOD AQUA Deep Blue Dominio 03, b) AOD TERRA Deep Blue Dominio 03 y c) AOD VIIRS Deep Blue Dominio 03. ....	73
Figura N°45: PDF e Histograma de parámetros de calidad de aire y meteorología del Dominio 03, obtenidos de SENAMHI: a) <i>PM</i> 10, b) <i>PM</i> 2.5, c) Temperatura, d) Humedad Relativa, e) Precipitación y f) Velocidad de Viento. ....	75
Figura N°46: PDF e Histograma de información satelital del Dominio 03, obtenidos de SENAMHI: a) AOD – AQUA Deep Blue Dominio 03, b) AOD – AQUA Dark Tarjet Dominio 03, c) AOD – TERRA Deep Blue Dominio 03, d) AOD – TERRA Dark Tarjet Dominio 03, e) AOD – SUOMI NPP Deep Blue Dominio 03 y f) AOD – SUOMI NPP Dark Tarjet Dominio 03. ....	76
Figura N°47: Proyección de información de AOD del algoritmo Dark Target sobre el parámetro de Temperatura del Dominio 03, obtenido de MODIS, VIIRS y SENAMHI: a) AOD – AQUA Dark Target Dominio 03, b) AOD – TERRA Dark Tarjet Dominio 03 y c) AOD – VIIRS Dark Target Dominio 03. ....	77
Figura N°48: Proyección de información de AOD del algoritmo Deep Blue sobre el parámetro de Temperatura del Dominio 03, obtenido de MODIS, VIIRS y SENAMHI: a) AOD – AQUA Deep Blue Dominio 03, b) AOD – TERRA Deep Blue Dominio 03 y c) AOD – VIIRS Deep Blue Dominio 03.....	78
Figura N°49: Proyección de información de AOD del algoritmo Dark Target sobre el parámetro de Humedad Relativa del Dominio 03, obtenido de MODIS, VIIRS y SENAMHI: a) AOD – AQUA Dark Target Dominio 03, b) AOD – TERRA Dark Target Dominio 03 y c) AOD – VIIRS Dark Target Dominio 03. ....	79
Figura N°50: Proyección de información de AOD del algoritmo Deep Blue sobre el parámetro de Humedad Relativa del Dominio 03, obtenido de MODIS, VIIRS y SENAMHI: a) AOD – AQUA	

Deep Blue Dominio 03, b) AOD – TERRA Deep Blue Dominio 03 y c) AOD – VIIRS Deep Blue Dominio 03. .... 80

Figura N°51: Proyección de información de AOD del algoritmo Dark Target sobre el parámetro de Velocidad de Viento del Dominio 03, obtenido de MODIS, VIIRS y SENAMHI: a) AOD – AQUA Dark Target Dominio 03, b) AOD – TERRA Dark Target Dominio 03 y c) AOD – VIIRS Dark Target Dominio 03. .... 81

Figura N°52: Proyección de información de AOD del algoritmo Deep Blue sobre el parámetro de Velocidad de Viento del Dominio 03, obtenido de MODIS, VIIRS y SENAMHI: a) AOD – AQUA Deep Blue Dominio 03, b) AOD – TERRA Deep Blue Dominio 03 y c) AOD – VIIRS Deep Blue Dominio 03. .... 82

## Índice de ecuaciones

<b>Ecuación N°01.</b> Ecuación del test de Mann-Kendall .....	46
<b>Ecuación N°02.</b> Ecuación del test de Mann-Kendall .....	47
<b>Ecuación N°03.</b> Ecuación de la pendiente de Sen .....	47
<b>Ecuación N°04.</b> Ecuación de la pendiente de Sen como mediana.....	47

## 1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El problema de la contaminación atmosférica generada por las actividades antropogénicas (Ordóñez et al., 1999) da su inicio desde el descubrimiento del fuego por el hombre, y se torna importante a partir de la revolución industrial y el uso masivo de combustibles fósiles como fuente de energía. Este problema se caracteriza como la conglomeración de distintas sustancias presentes en la atmósfera (Gaviria et al., 2011) y las fuentes de estos contaminantes en la atmósfera pueden ser de origen natural o antropogénico, (Llanque, 2004). Este último lo incrementa el parque automotor, como aportador de contaminantes atmosféricos debido a las transformaciones introducidas por la sociedad sobre los hábitats naturales, donde por un manejo inadecuado de las restricciones del ambiente se supera la capacidad de resiliencia. Las consultas hospitalarias para los grupos de asma, bronquitis, infecciones y rinitis tienen una relación positiva con la contaminación de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  (Gaviria et al., 2011), donde se obtuvo un coeficiente de determinación entre 0.60 y 0.75 para las consultas hospitalarias antes mencionadas.

Por otro lado, estudios referentes a PM y AOD brindan diferentes tipos de resultados al evaluarse en cierta zona y en cierto periodo de tiempo; uno de ellos es el estudio de caso entre los niveles medios de AOD registrados por MODIS en los satélites TERRA y AQUA, y las concentraciones de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  de estaciones de monitoreo continuo de la ciudad de Valencia, España (Represa et al., 2018). Se obtuvo una correlación de 0.31, no significativa entre AOD vs  $PM_{10}$ ; sin embargo, AOD vs  $PM_{2.5}$  presenta un coeficiente de correlación no significativo pero mayor, con un valor de 0.49 en su evaluación de la distribución espacial de los contaminantes atmosféricos.

El presente trabajo realiza una evaluación de los productos satelitales provenientes de los sensores VIIRS, a bordo del satélite SUOMI NPP y del sensor MODIS, proveniente de los satélites AQUA y TERRA; para representar datos de calidad de aire obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) en la provincia de Lima, Perú. La evaluación mencionada consta de la aplicación de los métodos estadísticos de “Máximos y Mínimos”, “Función de densidad de probabilidad”, “Método de proyección” y “Pendiente de Sen y Test de Mann Kendall”. Para el primer método estadístico se realizó un gráfico de valores extremos con la finalidad de determinar si existe algún conjunto de datos que se encuentren fuera del rango donde la mayoría de datos se dispersan. Para el segundo método, el método de distribución de probabilidad se presenta sobre una variable continua (PM y AOD); para el tercer método se aplicará el método de proyección para determinar la curva sobre datos de clima; y finalmente, se aplica el Test de Mann Kendall y Pendiente de Sen para determinar las tendencias que siguen las bases de datos de los mejores dominios determinados (Thomson & Emery, 2014).

Una vez realizada la aplicación de los métodos estadísticos, se espera que, para el método de Máximos y Mínimos, los rangos de los conjuntos no se encuentren fuera del rango donde se dispersa la mayoría de datos en los dominios establecidos. Para el método de Función de densidad de probabilidad se espera que la representación de la distribución de probabilidad de los parámetros de PM y AOD tengan una distribución normal; y luego para la aplicación del método de proyección se espera que los datos de la información satelital obtenida proyecte una curva definida o indefinida sobre los datos de clima estudiados; y finalmente, para el método de Test de Mann Kendall y Pendiente de Sen, se espera que los conjuntos de datos de AOD para los algoritmos y satélites evaluados presenten una misma tendencia entre AOD y  $PM_{10}$ , AOD y  $PM_{2.5}$  o viceversa.

## 1.0. Antecedentes y revisión del estado del arte

Los principales contaminantes atmosféricos son el dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y las partículas derivadas de la oxidación de combustibles fósiles incluidos el monóxido de carbono (CO), el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y el ozono ( $O_3$ ) (Ordóñez et al., 1999). Las características de estos contaminantes son:

Las partículas en suspensión abarcan las sustancias sólidas o líquidas, orgánicas o inorgánicas que están dispersas en el aire. Se denominan así a aquellas con diámetros desde muy por debajo de  $0.1 \mu m$  hasta  $5-10 \mu m$ , que permanecen suspendidas durante horas o días.

El dióxido de azufre es un gas incoloro que en altas concentraciones se detecta por su sabor y su olor, este gas se disuelve fácilmente en agua para formar ácido sulfúrico, luego se oxida lentamente y forma ácido sulfúrico con el oxígeno del aire. A su vez, éste  $SO_2$  también forma trióxido de azufre que cuando se combina con el vapor de agua forma un aerosol de ácido sulfúrico muy fino.

El dióxido de nitrógeno, quien junto al óxido nítrico (NO) son los más abundantes óxidos nitrogenados producidos por el hombre en área urbanas, se producen de forma natural en cantidades superiores a las generadas por la actividad humana teniendo una distribución sobre la superficie terrestre demasiado baja.

El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro e insípido que en la naturaleza se genera en la producción y degradación de clorofila, mientras que su origen antropogénico se debe a la combustión incompleta del hidrocarburo. Este gas presenta una afinidad con la hemoglobina mayor que por el oxígeno ( $O_2$ ), formando así carboxihemoglobina (COHb); ésta forma hace que disminuya la capacidad de la sangre para transportar oxígeno conllevando a efectos psicológicos y cardiovasculares.

La revisión del estado del arte sobre el estudio a presentar se divide en dos temas profundamente relacionados: "Análisis, evaluación y/o correlación espacio-temporal del espesor óptico de aerosoles registrados por sensores a bordo de satélites y los datos de Material Particulado, presión, temperatura, humedad relativa, precipitación, velocidad y dirección del viento registrados en superficie terrestre", "Estimación del espesor óptico de los aerosoles y/o Material Particulado, aplicando predicción mediante modelos tales como la Regresión Lineal Múltiple (MLR), Modelo de Efecto Mixto (MEM), Modelo de Transporte Químico (CTM), Correlación Lineal (LC)".

Así mismo, también se revisó la literatura de la aplicación de la función de densidad de probabilidad, donde el estudio "Una función de densidad de probabilidad condicional para la previsión de datos sobre la calidad de aire del ozono" aplicado en la región de Vancouver en la Columbia Británica y determinó la probabilidad de superar un nivel de concentración de  $O_3$  dado, teniendo en cuenta la estacionalidad y la correlación serial en serie temporal de 0. Se usó un modelo el cual fija el elemento temporal (es decir, el modelo predice la F.D.P de mañana) y llegó a la conclusión que las concentraciones de ozono no se distribuyen independientemente ni son estacionarias en el tiempo, proponiendo que, para generar previsiones probabilísticas de las concentraciones de oxígeno, se utilice propiedades derivadas de las mediciones históricas de oxígeno en determinados lugares (Robeson & Steyn, 1989).

Por otro lado, un estudio reciente en época de pandemia por el COVID-19, donde se aplicó la función de densidad de probabilidad en la India para investigar la distribución de los datos de los contaminantes  $PM_{2.5}$  del año 2020 comparándolo con los datos del año 2019. Se obtuvo como resultado que la reducción de  $PM_{2.5}$  durante el periodo de cierre de 2020 en comparación con el mismo periodo del 2019 es suficientemente grande (Mishra et al., 2021).

Las investigaciones referentes al análisis, evaluación y/o correlación espacio-temporal del espesor óptico de aerosoles registrado por sensores a bordo de satélites y datos registrados en superficie terrestre se puede encontrar en mayor número en Europa y Asia, Dong realiza un análisis de las tendencias de variación y causas del AOD en la provincia de Shaanxi utilizando datos del sensor Espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) (Dong et al., 2013), donde sus resultados muestran que la distribución del aerosol es afectada en gran medida por la topografía y las actividades económicas locales. Así, se estableció que el máximo AOD que se produjo fue en regiones donde tienen menor altitud, así mismo, se observó un máximo de AOD en verano y primavera.

Una correlación encontrada entre el Aerosol Optical Depth MODIS (MODIS AOD) y las partículas medidas en superficie (Red Robótica Aerosol, AERONET) fue de Tzu-Chin, quien obtuvo un coeficiente de correlación 0.91 para el satélite Terra y un valor de 0.83 para el satélite Aqua teniendo como área de estudio Taiwan (Tzu-Chin et al., 2011).

Otra comparación entre el espesor óptico de productos satelitales y data de superficie terrestre encuentra una correlación entre el AOD obtenido del sensor MODIS y el Índice de Contaminación del Aire (API) en Quigdao, China; obteniendo una relación lineal por regresión y un coeficiente de correlación de 0.8 para los años 2008 y 2009 (Jinshan et al., 2011).

Estudios sobre análisis, evaluación y/o correlación elaborados en América del Sur aplicando una correlación entre datos de AOD obtenidos de los instrumentos de los satélites Aqua y Terra, y los datos de PM obtenidos de una estación de calidad de aire del municipio de Córdoba, Argentina (Della, 2018); incorporan las variables meteorológicas del lugar, obtienen una tendencia de incremento de AOD a lo largo del tiempo, entre 2003 – 2013, el cual se relaciona con el incremento de la densidad poblacional.

Un estudio de variabilidad temporal de espectro óptico de los aerosoles aplicado en Huayao, Huancayo, establece una correlación entre los datos AOD del sensor MODIS, y los datos que brinda la red AERONET ubicado en el departamento de Huancayo, Perú (Hermosta, 2017), obteniendo como resultado un coeficiente de correlación de 0.01718, el cual es demasiado bajo como para mencionar un análisis factible entre ambos datos.

Una estimación espacio-temporal donde se abarca varios departamentos peruanos como Loreto, Piura, Ucayali, Madre de Dios, Tacna y Lima, evaluó la dinámica del AOD relacionándolo con parámetros de presión, temperatura, dirección del viento, relieve, superficie y la quema de biomasa (Cholan, 2016).

En el departamento de Madre de Dios y Ucayalli, donde ocurrieron gran cantidad de incendios, se analizaron datos registrados por el sensor MODIS a bordo del satélite TERRA y el sensor de Sonda Infrarroja Atmosférica (AIRS) a bordo del satélite AQUA para los meses de agosto y setiembre (Cholan, 2016), apreciando que el AOD se encuentra altamente condicionado por la quema de vegetación, teniendo efectos en departamentos contiguos mas no en los costeros.

Finalmente, Rojas estudió la dinámica de los aerosoles en Perú y América del Sur realizando una comparación entre los datos de las imágenes del sensor MODIS de nivel L3, a bordo de los satélites TERRA y AQUA, y los datos de AOD in-situ de las estaciones AERONET distribuidos en América del Sur (cuatro en Brasil, uno en Chile y uno en Bolivia) (Rojas, 2014). Encontró un alto coeficiente de determinación AOD-MODIS (entre MODIS Terra y MODIS Terra) vs AOD-AERONET entre 0.8 y 0.9 en 4 estaciones de Brasil y un bajo coeficiente de determinación de 0.4 para una estación de Chile y 0.6 para una estación de Bolivia.

Un conjunto de investigaciones realizadas sobre estimaciones del AOD y/o PM, aplicando predicción mediante modelos tales como la Multiple Linear Regression (MLR, desde ahora), Mixed-Effect Model (MEM, desde ahora), Chemical Transport Model (CTM, desde ahora), Linear Correlations (LC, desde ahora), entre otros; se puede encontrar en América del Sur y otros con área de estudio en otros continentes, (Chu et al., 2016), revisaron y analizaron 116 artículos de predicción que utilizan principalmente 4 modelos de predicción: MLR (25 artículos), MEM (23 artículos), CTM (16 artículos) y Regresión ponderada geográficamente (10 artículos), los cuales representan el 26%, 23%, 16% y 10% respectivamente para los artículos revisados. Obteniendo como resultado que: “MEM presenta el mejor rendimiento generando coeficientes de determinación de 0.83 y 0.81, MLR posee el peor rendimiento al obtenerse un coeficiente de determinación entre 0.43 y 0.59; CTM predice el PM<sub>2.5</sub> mejor a escala global con valores de coeficientes de determinación 0.656 y 0.78 para estudios en Norteamérica, mientras que el modelo de Geographically Weighted Regression (GWR, desde ahora) ofrece buenos resultados a nivel regional con resultados de coeficientes de determinación de 0.76 y 0.81 para estudios en China.

En un estudio llevado a cabo en Córdoba, Argentina, se realizó un análisis temporal y espacial de los aerosoles, y aplicó el modelo de regresión lineal simple para evaluar la relación entre AOD-PM<sub>10</sub>, obteniendo un coeficiente de determinación de 0.26. Así mismo, aplicó el modelo MLR donde incorporó parámetros de humedad relativa, temperatura, velocidad y dirección del viento; así como se tuvo en cuenta la altura de la capa límite para finalmente obtener un coeficiente de determinación de 0.24 concluyendo que la data obtenida no es idóneo para demostrar el cambio de los datos de PM medidos en superficie en base a los datos de AOD de satélites (Della, 2018).

Una estimación del parámetro de PM<sub>10</sub> a partir de correlaciones entre mediciones in-situ y datos de AOD que son estimados del sensor de Generador de Imágenes de Tierra Operacional (OLI), el cual se encuentra a bordo del satélite Landsat 8 realizando una diferencia entre la Reflectancia planetaria en el tope de la atmósfera (TOA) y la reflectancia en la superficie terrestres (DOS1) en el área urbana de Cuenca, Ecuador, (Abad, 2016). Aplicando un modelo de regresión lineal múltiple obtiene un resultado para el coeficiente de determinación de 0.55, por lo que la estimación PM<sub>10</sub> vs AOD no presenta correlación significativa para la ciudad de Cuenca.

Aplicando modelos Gaussianos se obtuvo una correlación entre los datos de AOD del sensor MODIS y los datos de calidad de aire que proporciona una estación de monitoreo en tierra en el sector sur del Valle del Cauca, Colombia; además generaron series de tiempo de la concentración de PM<sub>10</sub>, (Céspedes et al., 2015), los resultados obtenidos de coeficientes de determinación oscilan entre 0.7 y 0.9 para el año 2011; siendo los resultados una verificación del uso de sensores remotos como método adicional al monitoreo de calidad de aire tradicional.

Las áreas de aplicación de los estudios presentados incluyen tanto países de América del Sur i.e. Chile, Argentina, Bolivia, Ecuador, Colombia y Perú; como países de otros continentes. Los resultados son independientes, con indicadores de desempeño que varían con respecto a la inclusión de variables meteorológicas, condición topográfica y estacionales, entre otras. Los estudios reportados en Perú se han enfocado en la comparación entre el AOD registrado por datos satelitales y el AOD registrado por estaciones en tierra.

El presente estudio tiene como objetivo principal evaluar los datos obtenidos de productos satelitales AQUA, TERRA y SUOMI NPP para el estudio de la calidad del aire en el periodo 2015 – 2019 en la ciudad de Lima. Los objetivos específicos son la evaluación de la representatividad espacial y temporal de los datos satelitales, datos de calidad de aire y meteorológicos durante el periodo 2015 -2019; realizar la integración temporal y espacial de los datos satelitales y datos observados mediante bases de datos locales; y finalmente, realizar un análisis de la relación existente entre las variables reportadas usando métodos estadísticos.

Los datos con los que se lleva a cabo el presente estudio fueron extraídos de la interfaz que administra la NASA, EARTHDATASEARCH y LAADS DAAC, donde para la primera interfaz se extrajeron los datos de productos satelitales correspondientes al AOD de los satélites AQUA y TERRA con los algoritmos Dark Target y Deep Blue; mientras que para la interfaz LAADS DAAC se extrajeron los datos de AOD del satélite SUOMI NPP con los algoritmos Dark Target y Deep Blue. Así mismo, para los datos medidos en tierra se utilizaron los solicitados por el SENAMHI los cuales son parámetros de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad de viento y precipitación, que no se incluirá en el estudio.

El resultado que se espera es que las tendencias que presenten las bases de datos mencionadas en el párrafo anterior sean las mismas para los parámetros de  $PM_{10}$  o  $PM_{2.5}$  dependiendo del algoritmo usado. De la misma manera se aplican tres dominios (dos dominios de 25kmx25km y un dominio de 50kmx50km) para determinar la tendencia de manera regional y de la misma manera se espera que las tendencias sean iguales a las seguidas por los valores en tierra.

La conclusión esperada es que los dominios establecidos de manera regional tengan una tendencia igual a la seguida por el conjunto de datos proporcionados de tierra; y de manera más específica, que los algoritmos de Deep Blue tengan la tendencia de un parámetro de calidad de aire y Dark Target tenga la tendencia del otro parámetro de calidad de aire.

### **1.1. Planteamiento del problema**

¿Cuál es la habilidad de productos satelitales para representar datos observados de calidad de aire ubicados en la provincia de Lima?

El presente estudio tomó en cuenta dos tipos de métodos de recolección de datos, los cuales son datos de estaciones meteorológicas y de estaciones de calidad de aire; que para este estudio se encuentran ubicados en diferentes distritos de la provincia de Lima; y los productos satelitales, los cuales son representados por el AOD y se generan mediante un algoritmo proveniente de la radiación medida por los satélites espaciales que orbitan alrededor de la Tierra en diferentes periodos.

El trabajo de investigación estuvo comprendido entre el periodo del 2015 al 2019, debido a que las estaciones de calidad de aire iniciaron sus funciones a partir de ese año. Los datos se

obtienen de forma discontinua, debido a mantenimiento, daños de equipos, entre otros factores.

## 1.2. Justificación

La calidad del aire en la ciudad de Lima para el año 2018 presentó un grado de contaminación moderada con una concentración media anual de  $28.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respecto al  $PM_{2.5}$ ; así mismo, menciona que la ciudad de Lima es la octava ciudad más contaminada de Latinoamérica, posicionándolo así en el puesto 22 a nivel mundial según el diario Gestión, el cual se basa en el reporte del ([World Air Quality Report 2018, 2019](#)) (WAQR, desde ahora).

Para el año 2019, la ciudad de Lima se posicionó en el puesto 28 de ciudades con mayor cantidad de  $PM_{2.5}$  y con una concentración media anual de  $23.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mejorando la calidad del aire respecto al año anterior, pero manteniéndose valores de rango moderado. ([WAQR 2019, 2020](#)).

Durante los últimos años el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) elabora informes técnicos respecto a la calidad del aire en la ciudad de Lima ([INEI, 2018a](#)), es así que en su estudio para el mes de febrero del año 2018 presentó como resultados valores de  $PM_{10}$  excedidos comparados con el ECA-Aire para la estación de Puente Piedra, ATE, Huachipa y San Juan de Lurigancho; mientras que para los demás parámetros contemplados en el ECA-Aire si se cumplió con lo establecido en la norma. Estos niveles de  $PM_{10}$  superados en los distritos antes mencionados, según diario gestión, fue debido al incremento del parque automotor durante un largo periodo de tiempo. Estos niveles altos en los valores de MP, brindan como meta a los organismos del estado tener un mecanismo de mitigación para todos los parámetros que se relacionan con la calidad del aire de tal manera de que no se tenga como efecto el deterioro de la salud de las personas ni del medio ambiente.

En consecuencia, SENAMHI como entidad rectora en la evaluación del clima en el Perú, tiene a cargo la tarea de evaluar la calidad del aire en los distritos de Lima realizándolo mediante estaciones de monitoreo convencionales repartidos en ciertos distritos de Lima. Este tipo de mediciones se ha establecido por mucho tiempo en el país tanto para el uso en actividades de organizaciones estatales como privadas ayudando a obtener resultados en puntos fijos; sin embargo, el costo de implementación de redes de monitoreo para calidad de aire implican costos elevados tanto para organismos estatales como para el sector privado, haciendo que existan muy pocas estaciones a nivel provincial obteniendo como resultado muy pocos datos de la calidad del aire en un área establecida o en su defecto, no tener la posibilidad de obtener datos en ciertas zonas, como por ejemplo, los distritos de Comas, Ancón, Villa el Salvador, Cieneguilla, Chaclacayo y Lurigancho; debido a que éstos distritos no se encuentran lo suficientemente cerca entre sí como para puedan ser considerados que poseen similar calidad de aire.

Por otro lado, existen otros tipos de sistemas, los cuales vienen emergiendo como instrumentos de investigación durante ya algunas décadas. Uno de ellos es la teledetección, la cual puede ayudar a determinar la concentración de diversos contaminantes en cierto lugar, presentando ventajas como tener cobertura espacial donde no hay estaciones en tierra, visualización de datos en tiempo y espacio cuasi-real, agrega valor en combinación con modelos y estaciones en tierra; y también desventajas como la cobertura temporal (para orbitas polares son 1 o 2 observaciones al día por sensor), falta de sensibilidad cerca de las superficie, falta de identificación específica por tipo de contaminante y que la mayoría de

sensores que se tienen son pasivos, esto indica que no se puede obtener data para hora de la noche. Es por esto que se debe evaluar el tipo de resolución espacial, temporal, radiométrica y espectral que presenta cada instrumento y así elegir la opción correcta que pueda representar el contaminante o contaminantes que se quiere analizar.

Los datos que generan estas fuentes satelitales, los cuales tienen como instrumento de medición sensores, según diversas investigaciones ya revisadas en el capítulo de Estado del Arte, presentan en la gran mayoría de casos bajo potencial para evaluar la calidad de aire con ciertos parámetros en diversas áreas. Es por esto que, para poder integrar a manera de gestión complementaria un sistema ideal eficiente y eficaz para obtener datos sobre calidad de aire a tiempo cuasi-real se debe establecer una representatividad entre estos dos tipos de metodologías y con un análisis certero definir la habilidad que presenta este último sistema comparado con el sistema de monitoreo tradicional.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

- Analizar la información obtenida de satelitales para el estudio de la calidad del aire durante el periodo 2015-2019 en la Ciudad de Lima - Perú.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Examinar la representatividad temporal y espacial de información satelital, datos de calidad de aire y meteorológicos reportados por las estaciones de calidad de aire durante el periodo 2015 - 2019.
- Sintetizar la integración temporal y espacial de información satelital y datos de monitoreo en tierra mediante bases de datos locales.
- Analizar la relación existente entre variables reportadas por estaciones de calidad del aire e información satelital usando métodos estadísticos.

### **1.4. Hipótesis**

#### **1.4.1. Hipótesis general**

- El caso de estudio demuestra mediante el análisis estadístico que la información satelital tiene la habilidad de representar datos obtenidos de calidad del aire en la ciudad de Lima.

### **1.5. Contexto de la investigación**

La presente investigación tiene como área de estudio la provincia de Lima del departamento de Lima, Perú; se encuentra situada en la costa central del país, donde limita por el Norte con la provincia de Huaral; por el Oeste con la provincia constitucional del Callao y el océano

Pacífico; por el Este con la provincia de Canta y provincia de Huarochiri; y por el sur con la provincia de Cañete (INEI, 2018b); tal como se muestra en la **Figura N°01**.



Figura N°01: Mapa de la provincia de Lima.

Fuente: *Elaboración propia, 2020.*

La provincia de Lima presenta una población de 8 574 974 habitantes, entre población urbana y rural, donde la mayor concentración de habitantes se encuentra en los distritos de San Juan de Lurigancho, San Martín de Porres, Ate y Comas con 1 millón 38 mil 495 personas, 654 mil 83 personas, 599 mil 196 y 520 mil 450, respectivamente; siendo esta agrupación la tercera parte de toda la población en la provincia de Lima (INEI, 2018b).

Lima presenta 43 distritos los cuales están divididos en Lima Norte, Lima Centro, Lima Este y Lima Sur, con 8 distritos, 15 distritos, 9 distritos y 11 distritos respectivamente tal y como se muestra en la **Tabla N°01**.

**Tabla N°01.** Distritos de Lima provincia

Lima división	Distritos	Número
Lima Norte	Ancón, Santa Rosa, Carabayllo, Puente Piedra, Comas, Los Olivos, Independencia y San Martín de Porres.	08
Lima Centro	Rímac, Lima, Breña, La Victoria, San Miguel, Pueblo Libre, Magdalena del Mar, Jesus María, Surquillo, Miraflores, Barranco, Santiago de Surco, San Borja, Lince y San Isidro.	15
Lima Este	San Juan de Lurigancho, El Agustino, Santa Anita, San Luis, La Molina, Ate, Lurigancho, Chaclacayo y Cieneguilla.	09
Lima Sur	Chorrillos, San Juan de Miraflores, Villa María del Triunfo, Villa el Salvador, Pachacámac, Lurín, Punta Hermosa, Punta Nehgra, San Bartolo, Santa María del Mar y Pucusana.	11

Fuente: *Elaboración propia, 2020.*

La presente investigación se centró en el área que cubre los mencionados distritos, cuyas coordenadas se detallan en la **Tabla N°02**, teniendo en consideración que el SENAMHI cuenta con estaciones meteorológicas y de calidad del aire que cubre las extensiones de los distritos pertenecientes a Lima Norte, Lima Centro, Lima Este y Lima Sur.

**Tabla N°02.** Coordenadas de la provincia de Lima

ORIENTACIÓN	NORTE	ESTE	SUR	OESTE
Latitud sur	11° 34' 21''	11° 57' 11''	12° 31' 12''	11° 46' 60''
Longitud oeste	77° 04' 01''	76° 38' 50''	76° 47' 03''	77° 11' 54''
Lugar	Cerro Aucallama, aprox. 1.19 km de la quebrada Montura.	Sobre la quebrada Pomada, aprox. 1.40 km del cerro Santa Ana.	En los límites de la Playa Punta Ñaves, con la carretera Panamericana Sur.	Playa Salitral límite con el Océano Pacífico.

Fuente: (INEI, 2018b).

## 1.6. Definición de variables

En la presente investigación se estudió la relación PM<sub>2.5</sub>-AOD y PM<sub>10</sub>-AOD, que esta reportada en la literatura como:

$$PM_{2.5} = f(AOD, \eta)$$

$$PM_{10} = f(AOD, \eta)$$

Donde:  $\eta$  representa las condiciones locales (variables meteorológicas) y tiempo.

Por lo tanto, las variables se definen de la siguiente manera:

### 1.6.1. Variable dependiente

- Material Particulado menores a 10 micras ( $PM_{10}$ )
- Material Particulado menores a 2.5 micras ( $PM_{2.5}$ )

### 1.6.2. Variables independientes

- Espesor óptico de los aerosoles (AOD)
- Temperatura (T)
- Humedad Relativa (Hr)
- Velocidad de viento

En el caso de la variable de precipitación no se tiene en cuenta debido a que esta variable se presenta o registra cuando hay excedente de nubes en la capa límite, siendo las nubes y condiciones meteorológicas los factores que afectan mayormente a la disponibilidad de efectiva de radiación (IDEAM, s. f.).

## 1.7. Alcances y limitaciones del estudio

La presente investigación tiene como alcance realizar el estudio en la provincia de Lima, donde el SENAMHI tiene a su cargo 10 estaciones de monitoreo de calidad de aire. En el presente estudio se utiliza datos provistos por dichas estaciones, para evaluar la tendencia que existe entre los productos satelitales y los datos en tierra.

Los datos que se analizarán son:

- Material Particulado menores a 10 micras ( $PM_{10}$ )
- Material Particulado menores a 2.5 micras ( $PM_{2.5}$ )
- Temperatura (T)
- Humedad Relativa (Hr)
- Velocidad de viento

Los parámetros antes mencionados son monitoreados a través de una Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire (REMCA), la cual mide seis de los diez contaminantes estipulados en los estándares de calidad ambiental para aire. Ley General del Ambiente (Ley N° 28611), define al estándar de calidad ambiental como “la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el aire, agua y suelo en su condición de cuerpo receptor, que no representa

riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente” (MINAM, 2005). Cabe resaltar que en cada una de las estaciones se cuentan con estaciones meteorológicas automáticas y son las siguientes:

- Estación “Puente Piedra”
- Estación “Carabaylo”
- Estación “San Martín de Porres”
- Estación “San Juan de Lurigancho”
- Estación “Campo de Marte”
- Estación “Santa Anita”
- Estación “Huachipa”
- Estación “ATE”
- Estación “Villa María de Triunfo”
- Estación “San Borja”

Definidas las estaciones distribuidas en Lima Metropolitana, los datos fueron solicitados al Senamhi mediante “Atención al ciudadano”, donde los parámetros de cada estación antes mencionadas fueron solicitados por un periodo de tiempo de 05 años (2015 al 2019).

Unas de las limitaciones para realizar el estudio fue la poca cantidad de estaciones de calidad de aire que se tiene en el área de estudio (10 estaciones); y al ser al ser muy pocas, nos otorgan una desventaja para representar los datos en toda el área de Lima Metropolitana.

Las estaciones en mención entraron en funcionamiento desde el año 2015, es por eso que el presente estudio realiza el trabajo con datos desde este periodo de tiempo.

## 2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.0. Profundidad Óptica de Aerosol (AOD)

Es la medida en que los aerosoles reducen la transmisión de la luz, sea por efecto de dispersión o absorción, debido a partículas en suspensión presentes en la columna atmosférica. El AOD es una cantidad adimensional, integral del producto de la concentración del número de partículas y la sección transversal de extinción de partículas, a lo largo de una determinada trayectoria vertical a través de la atmósfera.

El AOD está determinada por el tipo de fuente (Instrumento a bordo de satélites que realizan la medición) y el procesamiento atmosférico posterior, algoritmos usados para su determinación (Dark Target o Deep Blue), interactúan con la energía radiante e influyen en el balance de calor del planeta (Como se cita en (Llorente, 2017)).

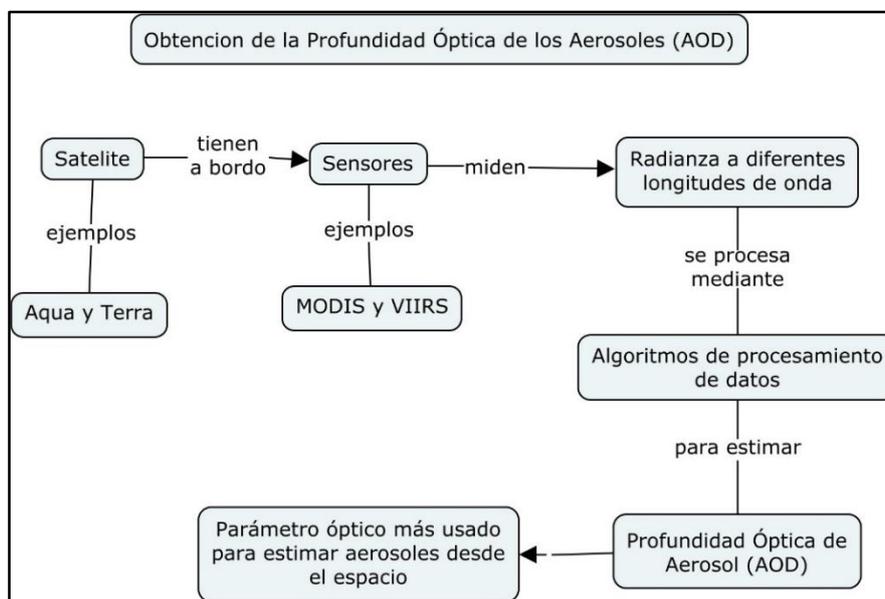


Diagrama N°01: Obtención de la Profundidad Óptica de los Aerosoles (AOD).

Fuente: *Elaboración propia, 2020.*

### 2.1. Sensores satelitales

Son dispositivos que pueden recibir radiación electromagnética proveniente de la superficie de la Tierra en cualquier rango de longitudes de onda; sin embargo, las categorías más empleada para el estudio de recursos naturales son de 0.4 a 0.13 micras (visible e infrarrojo) y entre 30 y 300 milímetros (Pérez, 2007). Conforme a la procedencia de los sensores, se puede clasificar en:

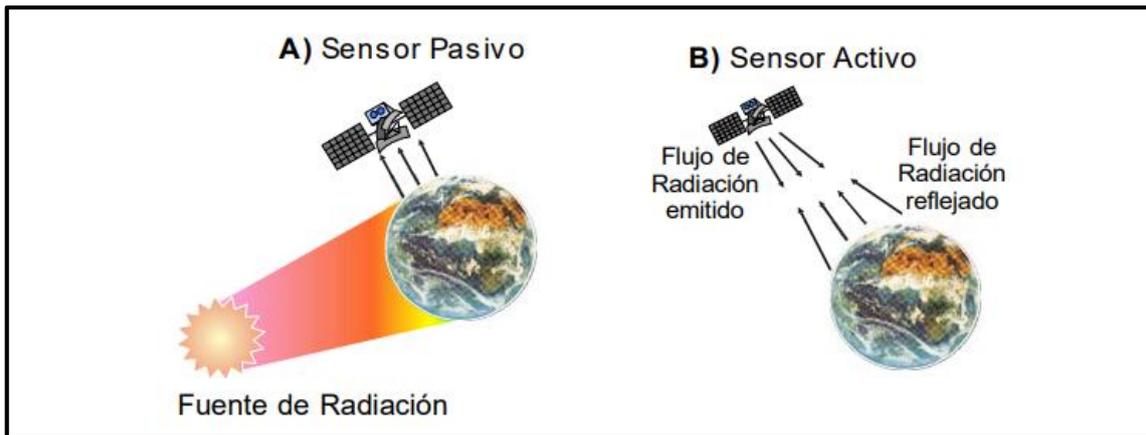


Figura N°02: Clasificación de sensores satelitales según su origen.

Fuente: (Pérez, 2007).

Según el origen de los sensores, se puede clasificar en:

### 2.1.1. Sensores pasivos

Los sensores pasivos solo recogen energía electromagnética que proviene de la superficie terrestre, pudiendo ser reflejada por los rayos solares ya emitida por su propia temperatura. Estos sensores pueden ser divididos en función al proceso que emplean para recibir la radiación que proviene de objetos: fotográficos (cámaras fotográficas), óptico-electrónicos (exploradores de barrido) y de antena (también llamados radiómetros de microondas) (Chuevico, 1995).

### 2.1.2. Sensores activos

Los sensores activos se caracterizan por emitir energía sobre un objeto y reciben la señal reflejada por el mismo. Los sensores activos más comunes son los sensores de RADAR (Radio Detection and Ranging), que trabajan en el rango de las microondas, razón por la cual es posible trabajar sobre cualquier condición atmosférica (Sánchez, 2011).

### 2.2. Instrumento Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

MODIS es un instrumento a bordo de los satélites TERRA y AQUA el cual orbita alrededor de la Tierra, en Terra de norte a sur a través del ecuador por la mañana, mientras que en AQUA pasa de sur a norte sobre el ecuador por la tarde. Terra MODIS y AQUA MODIS ven toda superficie de la Tierra cada 1 o 2 días, adquiriendo datos de 36 bandas espectrales o grupos de longitud de onda; éstos información aumentan el conocimiento de la relación y los procesos globales que ocurren en el mundo (NASA, 2021b).

### 2.3. Transferencia radiativa

Proceso de atenuación en la cual atraviesa la radiación electromagnética en un medio material. En el caso de la atmósfera, los procesos encuentran su origen en la interacción de la radiación electromagnética con las moléculas y partículas que compone la atmósfera terrestre (Príncipe, 2018). Se encuentran cuatro métodos de propagación radiativa:

### 2.3.1. Radiación

La radiación es el intercambio de energía por ondas electromagnéticas, el cual se produce desde una fuente hacia cualquier dirección, transmitiendo ondas o partículas a través del espacio o de algún medio. Las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse; así, estas ondas pueden atravesar el espacio y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas. La longitud de onda ( $\lambda$ ) y la frecuencia ( $\nu$ ) de las ondas electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión  $\lambda\nu = c$ , son importantes para determinar su energía y otras características. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad aproximada de 300.0 km/s (Inzunza, 2019).

### 2.3.2. Absorción

Concepto que anota a la absorción de la energía por parte de los gases que se encuentran presentes en la atmósfera, haciendo referencia principalmente al ozono, vapor de agua y anhídrido carbónico; haciendo que la observación espacial se reduzca a determinadas bandas del espectro, denominadas bandas atmosféricas (Bernardi, s. f.).

### 2.3.3. Dispersión

Es la dirección de propagación de la energía cambia aleatoriamente. La dispersión de Rayleigh y la dispersión de Mie son los dos tipos más importantes de dispersión que ocurren en la atmósfera (Congedo, 2017).

### 2.3.4. Extinción

Es el efecto combinado entre la Absorción y Dispersión, siendo que el coeficiente de extinción, para una radiación monocromática, es la suma de los coeficientes de absorción y difusión (Silva, 2015).

La **radiación monocromática** es aquella que está formada por componentes de un solo color, es decir, tiene una sola longitud de onda correspondiente al color (Gonzales, 2010), como por ejemplo, el color violeta tiene una longitud de onda entre 380 – 450 nm, el verde entre 495 – 570 nm.

Los **aerosoles** tienen una consecuencia en la transmitancia y dispersión de la radiación solar, siendo uno de los principales parámetros que incide en el movimiento de la irradiación hacia la tierra (Del Hoyo, 2016).

## 2.4. Satélites

Las plataformas que transportan los sensores o instrumentos, satélites, presentan características que influyen sobre las aplicaciones de las imágenes que generan. Éstos satélites se dividen en dos grandes grupos: Satélites de órbita geoestacionaria los cuales son aquellos satélites que acompañan el movimiento de rotación de la tierra (tienen un periodo de rotación orbital igual que el de la tierra); y satélites de órbita polar, los cuales circulan en sentido ligeramente noreste – suroeste en órbitas descendentes que los llevan directamente sobre los polos en cada órbita (Soria & Matar, 2016).

### 2.4.1. Satélite Aqua

Es una misión satelital de Ciencias de la Tierra de la NASA llamada así por la gran cantidad de información que la misión recopila sobre el ciclo del agua de la Tierra, incluida la evaporación

de los océanos, precipitación, aerosoles, cobertura vegetal en la tierra, vapor de agua en el aire, humedad del suelo, entre otros (NASA, 2021a). Aqua se lanzó el 4 de mayo de 2002 y tiene seis instrumentos de observación de la Tierra a bordo, que recopilan una variedad de conjuntos de datos globales; transmitiendo hasta ahora datos de alta calidad de cuatro de sus seis instrumentos, AIRS, AMSU, CERES y MODIS.

El estado actual del satélite Aqua, como se observa en la Figura N°03, contempla que cuenta con instrumentos operativos: AIRS, AMSU, CERES, MODIS y AMSR-E. La esperanza de vida actual es hasta principios de la década de 2020, siendo los datos de Aqua procesados y disponibles a través de varios centros de datos de la NASA.

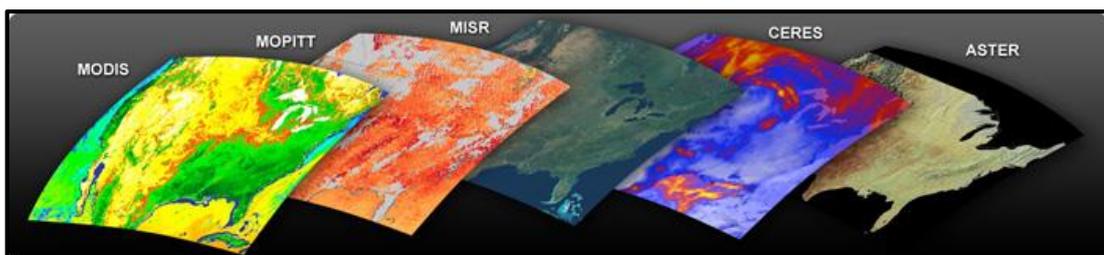


*Figura N°03: Satélite AQUA.*  
Fuente: (NASA, 2021).

#### 2.4.2. Satélite Terra

El satélite Terra tiene a bordo cinco instrumentos, como se observa en la Figura N°04, que toman las medidas coincidentes del sistema terrestre, Radiómetro de reflexión y emisión térmica espacial avanzado (ASTER), las nubes y el sistema de energía radiante de la Tierra (CERES), espectro radiómetro de imágenes de ángulos múltiples (MISR), medidas de contaminación en la troposfera (MOPITT) y MODIS (NASA, 2021c). Terra fue lanzada el 18 de diciembre de 1999 a una altitud de 705 kilómetros sobre la superficie terrestre y tiene una órbita polar circular sincronizada con el sol que la lleva de norte a sur cada 99 minutos.

El estado actual del satélite Terra contempla que cuenta con instrumentos operativos: ASTER, CERES, MODIS, MIRS y MOPITT. La esperanza de vida actual es hasta principios de la década de 2020; siendo los datos de Terra disponibles a través de varios centros de datos de la NASA.



*Figura N°04: Instrumentos a bordo del Satélite TERRA.*  
Fuente: (NASA, 2021).

### 2.4.3. Satélite Suomi NPP

EL satélite Suomi NPP, como se observa en la Figura N°05, es el primero de una nueva generación de satélites que monitoreará las múltiples facetas de la Tierra y reemplazarán los satélites lanzados entre 1997 y 2011 para observar la Tierra. El Suomi NPP orbita alrededor de la Tierra 14 veces al día y carga cinco instrumentos en su interior, el más grande e importante de ellos es el VIIRS (Visible Infrared Imager Radiometer Suite) (Cavero, 2013). El Suomi National Polar-orbiting Partnership (SNPP) recolecta y distribuye datos remotos del océano, tierra y atmósfera; fue lanzado el 28 de octubre de 2011 y se encuentra a 824 km de altura.

Los instrumentos que carga son:

Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS): un radiómetro microondas que ayudará a crear modelos de temperatura globales.

Cross-track Infrared Sounder (CrIS): un interferómetro que monitorea la presión.

Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) un grupo de espectrómetros que medirán el nivel de ozono, especialmente cerca a los polos.

Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS): un radiómetro de 22 bandas que capta luz visible e infrarroja para observar movimientos del hielo y cambios en la forma del terreno.

Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): un radiómetro que detecta radiación termal, incluyendo la radiación solar.



*Figura N°05: Satélite Suomi NPP junto a sus instrumentos.  
Fuente: (Cavero, 2013).*

### 2.5. Resolución espectral en sensores remotos

Este tipo de resolución indica el número y ancho de bandas espectrales que puede diferenciar un sensor, por lo que un sensor tendrá mayor resolución espectral cuando otorgue mayor número de bandas y menor ancho presente, debido a que facilita la caracterización espectral de las diferentes cubiertas (Chuevico, 1995). Se puede representar la resolución espectral por barras tal y como se muestra en la **Figura N°06**.

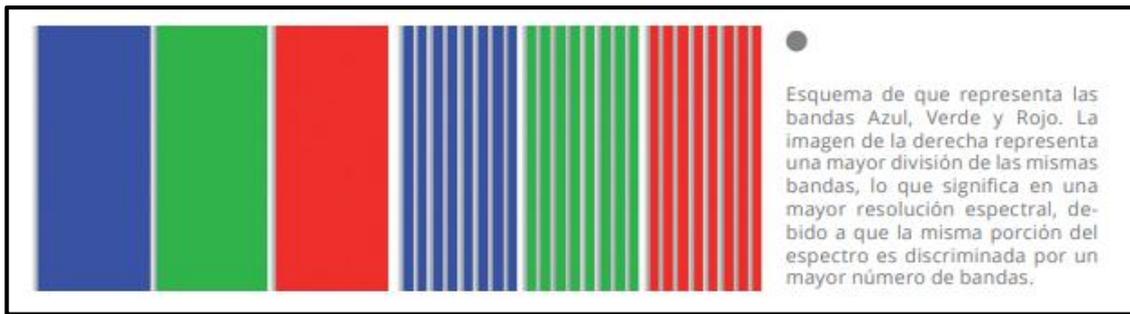


Figura N°06: Representación de la resolución espectral en banda azul, verde y rojo.

Fuente: (Schomwandt, 2015).

## 2.6. Resolución espacial en sensores remotos

La resolución espacial se refiere al detalle de un objeto que se quiere visualizar en una imagen, también llamado pixel. Dependiendo de los sensores se puede obtener diferentes tamaños de pixel determinando así el nivel de detalle de una imagen. Se representa los tamaños de pixel en la **Figura N°07**.



Figura N°07: Representación de tamaño de pixel de 30, 60 y 90 metros.

Fuente: (Schomwandt, 2015).

## 2.7. Resolución temporal en sensores remotos

Es el periodo con el que un sensor es capaz de obtener imágenes o que el satélite pase por un mismo punto de la superficie terrestre. Se presentan algunas características para que se genere el ciclo tal como el tipo de órbita del satélite, diseño del sensor, ángulo de observación, etc (Chuevico, 1995). La representación de la frecuencia del paso de un satélite se observa en la **Figura N°08**.

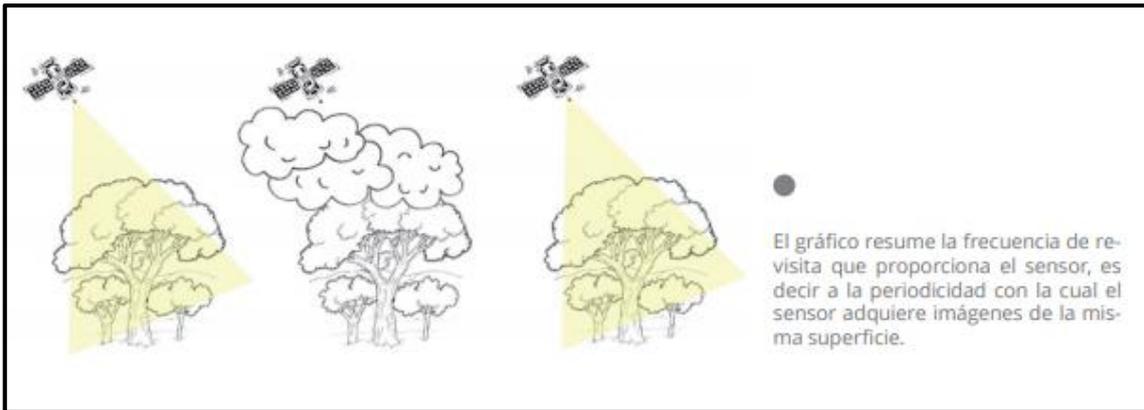


Figura N°08. Representación de la frecuencia del paso de un satélite.

Fuente: (Schomwandt, 2015).

## 2.8. Resolución radiométrica en sensores remotos

Se refiere a la capacidad del sensor para detectar pequeñas diferencias en la energía reflejada o emitida, mientras más fina es la resolución radiométrica del sensor, mayor es su capacidad para detectar pequeñas diferencias en la energía reflejada o emitida. Técnicamente es una medida de cuantos niveles de gris se miden entre el que corresponde a negro y el que corresponde a blanco (Karszenbaum & Barraza, s. f.). La resolución radiométrica tiene un rango de 6 bits (64 niveles) hasta 14 bit (16384 niveles).

### 3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

#### 3.0. Métodos

Con el fin de darle cumplimiento al objetivo principal del proyecto, la presente investigación se llevó a cabo en las siguientes tres fases secuenciales:

1. Representación temporal y espacial de los productos satelitales, datos observados de calidad de aire y meteorología para el periodo 2015 – 2019.
2. Integración información de los productos satelitales y base de datos observados de calidad de aire y meteorología, consolidando bases de datos.
3. Análisis estadísticos de la relación existente entre las variables reportadas de los productos satelitales y datos observados de calidad de aire y meteorología.

A continuación, se describe un diagrama general como el que se muestra en la **Figura N°09**, donde se mencionan las fases ejecutadas para la obtención de resultados.

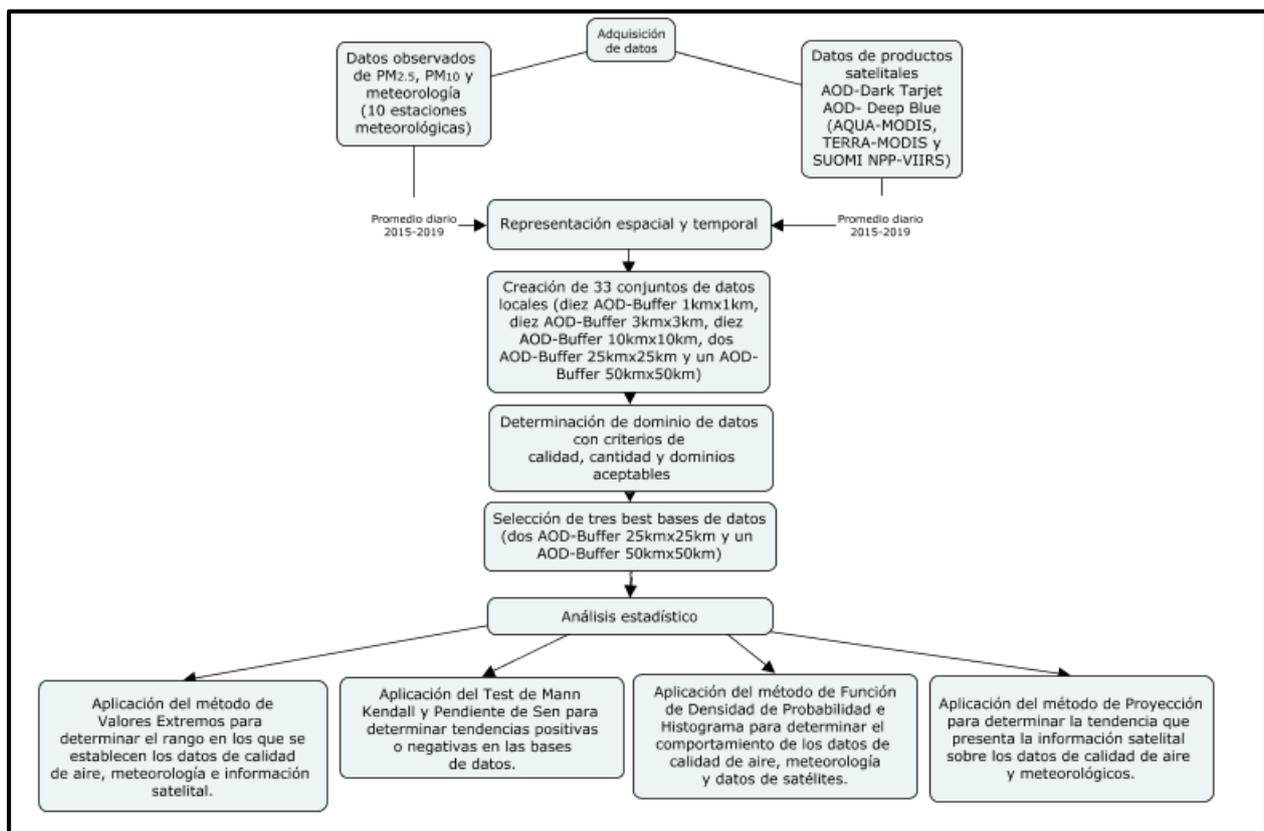


Figura N°09: Diagrama general de metodología.

Fuente: *Elaboración propia, 2021.*

Para comprender el diagrama de metodología que se aplicó en el presente trabajo, se procede a describir a continuación los pasos que se realizaron para realizar la investigación:

- **Recolección de los datos:** Primero se procede a recolectar los datos de los productos satelitales que ofrecen las organizaciones internacionales; para el presente estudio se recopiló información de la base de datos de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de AOD para el periodo del 2015 - 2019, dato que se extrajo de los

algoritmos proporcionados de Dark Target y Deep Blue que se aplicaron a la medición de radiación que realizaron los satélites AQUA, TERRA y SUOMI NPP; así mismo, para los datos de la superficie terrestre, se extrajeron las mediciones realizadas por las estaciones meteorológicas y de calidad de aire del SENAMHI para el mismo periodo de tiempo (2015 – 2019). En este caso, se solicitaron los datos al SENAMHI para acceder a dicha información.

- **Análisis de datos obtenidos:** Se realizó el análisis de los datos obtenidos elaborando series de tiempo para toda la base de datos obtenida, con los cual se obtuvieron 33 bases de datos divididos en diez AOD-Buffer 1kmx1km, diez AOD-Buffer 3kmx3km, diez AOD-Buffer 10kmx10km, dos AOD-Buffer 25kmx25km y un AOD-Buffer 50kmx50km, donde se aplicaron filtros para considerar la data que proporcione mejor dominio espacial y temporal. Los filtros que se tuvieron en cuenta fue el tiempo (2015 – 2019), debido a que el inicio de funcionamiento de las estaciones de calidad de aire fue en 2015; otra consideración que se tuvo en el caso de los productos satelitales fueron los días de dato no obtenido por la alta nubosidad en la zona de estudio; así mismo, no se tuvo en cuenta la data no registrada por las estaciones de monitoreo convencionales debido a mantenimiento, fallas u otros efectos adversos.
- **Determinación de la base de datos del dominio más representativos:** Una vez aplicado los filtros y realizado el análisis respectivo, se obtuvo las mejores bases de datos con los cuales se trabajó los métodos estadísticos; las bases que quedaron fueron dos AOD-Buffer 25kmx25km y un ADO-Buffer 50kmx50km.
- **Aplicación de métodos estadísticos:** Se aplicaron los métodos estadísticos de Test de Mann Kendall y Pendiente de Sen ([Thenmozhi & Kottiswaran, 2016](#)) con el fin de determinar las tendencias que siguen los conjuntos de bases de datos obtenidas de la información satelital para los dos dominios de 25kmx25km y para el dominio 50kmx50km. El objetivo de la aplicación de éstos métodos estadísticos es determinar la tendencia que siguen los datos de productos satelitales y los datos observados en tierra. También se aplicaron el método para determinar la distribución de densidad para datos de productos satelitales y la proyección de productos satelitales sobre datos de calidad de aire y meteorología ([Pruneau, 2017](#)).

### 3.1. Datos

Para la obtención de los datos, como ya se explicó en el punto 3.1, provendrán de dos tipos de fuente: Datos de los productos satelitales y Datos observados de tierra, en específico, los datos provienen de estaciones convencionales de calidad del aire y meteorológicas (diez estaciones).

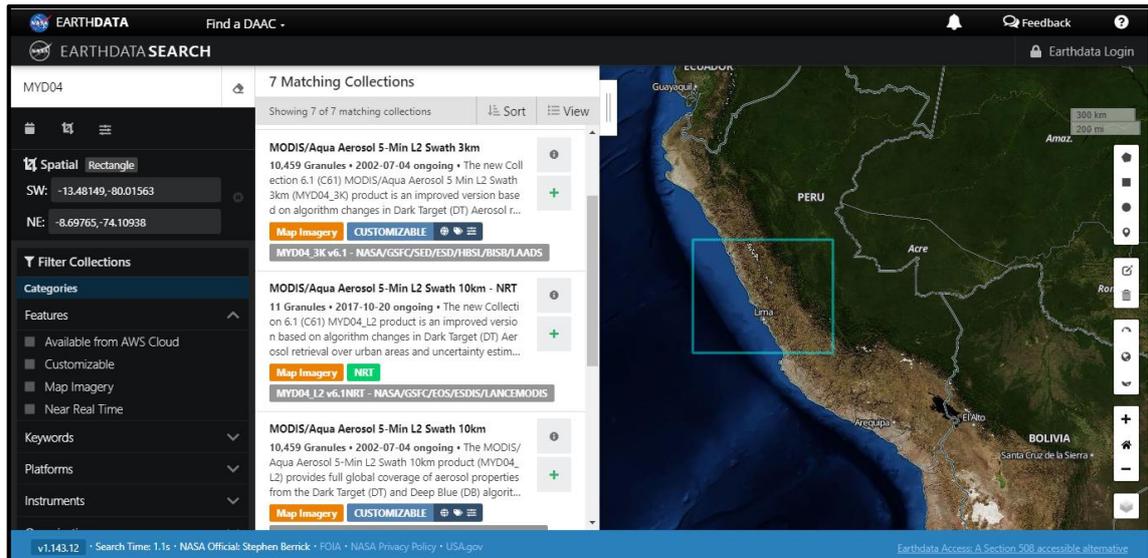
#### 3.1.1. Información de productos satelitales

La información que se utilizó para la presente investigación proviene inicialmente de la medición de radiación que realizan los instrumentos tales como: MODIS, VIIRS a bordo de satélites espaciales tales como: AQUA, TERRA, SUOMI NPP para luego, mediante algoritmos definidos tales como: Dark Target, Deep Blue se transforman en parámetros como un conjunto de datos como: AOD. Estos parámetros se generan dependiendo del tipo de instrumentos que se tiene en el satélite; para el caso del presente estudio, se utilizaron los satélites AQUA, TERRA y SUOMI NPP, quienes llevan consigo instrumentos que mediante los algoritmos de

Dark Target y Deep Blue, nos otorgan productos satelitales de aerosoles en una columna de la atmosfera.

Los tipos de instrumentos que pueden darnos productos satelitales de aerosoles para el presente estudio, vienen a ser los instrumentos MODIS, los cuales se encuentra a bordo del satélite AQUA y TERRA) y VIIRS (a bordo del satélite SUOMI NPP).

Para la extracción de los datos de productos satelitales de AQUA y TERRA. Se utilizó como herramienta la base de datos de EARTHDATA SEARCH, como se puede observar en la **Figura N°10**, página bajo administración de la NASA donde gestiona una gran base de datos de los satélites que se encuentran bajo su administración.



*Figura N°10: Interfaz de base de datos EARTHDATA SEARCH.*

*Fuente: (EARTHDATA SEARCH, 2021).*

En la base de datos antes mencionada se realizaron los filtros correspondientes para la búsqueda del producto satelital requerido, en este caso el filtro fue de MYD04\_3K, MYD04\_L2 y MOD04\_L2 los cuales corresponden al satélite AQUA de resolución espacial de 3km, satélite AQUA de resolución de 10Km y satélite TERRA de resolución de 10Km; siendo para todos los casos antes mencionado, MODIS el instrumento que se utilizó.

De la interfaz de la página del EARTHDATASEARCH, en la parte izquierda, se puede visualizar los múltiples filtros que se pueden aplicar como la delimitación del área de estudio, el parámetro necesitado, el periodo de tiempo, el instrumento y satélites requeridos. En la parte central se puede observar un resultado de productos satelitales de MODIS – AQUA al haber aplicado el filtro de MYD04 en la parte derecha. Y finalmente, en la parte derecha se observa el mapa de Perú con un rectángulo que delimita la provincia de Lima.

Una vez realizado el filtro para los productos satelitales de estudio, se procede a establecer el área de estudio el cual es, y como se mencionó en el párrafo anterior, la provincia de Lima dándole una extensión a los lados para que no se lleguen a perder datos.

Establecida el área preliminar para la provincia de Lima, se procedió a delimitar el periodo de tiempo como un filtro más, éste periodo de tiempo fue de cinco años y estuvo comprendido del 2015 al 2019. Para ser más específicos, el periodo de extracción de los productos satelitales

inicia a las 00:00 horas del 01-01-2015 y termina a las 23:59 horas del 31-12-2019, periodo de cinco años en la cual se realiza el estudio.

Finalmente se seleccionaron los productos satelitales MYD04\_3K, MYD04\_L2 y MOD04\_L2; y se ejecutó la descarga de todos los datos, donde se obtuvo de manera preliminar un listado resumen de descarga de todos los links en versión “HDF”, tal y como se muestra en la figura N°11. Cada link representa un conjunto de datos para el área de estudio definido, el parámetro definido y para cada día que se estableció el periodo de tiempo.

**Download Status**

This page will automatically update as your orders are processed. The Download Status page can be accessed later by visiting <https://search.earthdata.nasa.gov/downloads/7695034469> or the [Download Status and History](#) page.

**MODIS/Aqua Aerosol 5-Min L2 Swath 3km**

Status	Access Method	Granules
Complete (100%)	Download	10,459 Granules

Download your data directly from the links below, or use the provided download script.

Download Links | Download Script

Retrieved 10459 links for 10,459 granules.

Copy Save Expand

```

https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MYD04_3K/2018/212/MYD04_3K.A2018212.1825.061.2018213155652.hdf
https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MYD04_3K/2018/211/MYD04_3K.A2018211.1920.061.2018212154442.hdf
https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MYD04_3K/2018/210/MYD04_3K.A2018210.1835.061.2018211160738.hdf
https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MYD04_3K/2018/209/MYD04_3K.A2018209.1930.061.2018210154116.hdf
https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MYD04_3K/2018/209/MYD04_3K.A2018209.1755.061.2018210154123.hdf
https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MYD04_3K/2018/208/MYD04_3K.A2018208.1850.061.2018209160402.hdf
https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MYD04_3K/2018/208/MYD04_3K.A2018208.1845.061.2018209155902.hdf
https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MYD04_3K/2018/207/MYD04_3K.A2018207.1945.061.2018208153636.hdf
https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MYD04_3K/2018/207/MYD04_3K.A2018207.1940.061.2018208154121.hdf
https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MYD04_3K/2018/207/MYD04_3K.A2018207.1805.061.2018208154042.hdf
https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MYD04_3K/2018/206/MYD04_3K.A2018206.1900.061.2018207154618.hdf
https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MYD04_3K/2018/205/MYD04_3K.A2018205.1820.061.2018206161419.hdf
https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MYD04_3K/2018/205/MYD04_3K.A2018205.1815.061.2018206160702.hdf

```

Figura N°11: Listado resumen de los archivos “HDF” en EARTHDATA SEARCH.  
Fuente: (EARTHDATA SEARCH, 2021).

Debido a que los archivos “HDF” para los productos satelitales MYD04\_3K, MYD04\_L2 y MOD04\_L2 proporcionaban un aproximado de 5 mil links de descarga, con apoyo de la herramienta de programación se pudo descargar de manera automática y así resultando más accesible la extracción de todos los datos.

Para el uso de la herramienta de programación, se realiza con un conjunto de algoritmos simples usando el programa de Visual Studio Code. Se tuvo en cuenta que la base de datos del EARTHDATA SEARCH genera un script entonces se procedió a su uso en Visual Studio; sin embargo, el script que genera EARTHDATA SEARCH no contempla asegurarse que todos los archivos se descarguen de forma completa, por lo que una vez obtenido la descarga parcial de los datos, se procede a realizar un match de los links descargados con los del listado otorgado por EARTHDATA SEARCH y así descargar manualmente los links que faltan, como se puede observar en la Figura N°12 a manera de ejemplo.

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
MYD04_3K.A2019001.1900.061.2019002152737	19/10/2020 01:23 ...	Archivo HDF	7,110 KB
MYD04_3K.A2019002.1805.061.2019003160317	19/10/2020 01:23 ...	Archivo HDF	4,651 KB
MYD04_3K.A2019003.1845.061.2019004164159	19/10/2020 01:22 ...	Archivo HDF	6,110 KB
MYD04_3K.A2019004.1930.061.2019005164939	19/10/2020 01:22 ...	Archivo HDF	11,385 KB
MYD04_3K.A2019005.1835.061.2019006154558	19/10/2020 01:22 ...	Archivo HDF	5,267 KB
MYD04_3K.A2019006.1915.061.2019007155009	19/10/2020 01:22 ...	Archivo HDF	10,098 KB
MYD04_3K.A2019007.1820.061.2019008173958 (1)	19/10/2020 01:22 ...	Archivo HDF	6,288 KB

Figura N°12: Almacenamiento de archivos “HDF” en la base de datos local.  
Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Una vez descargados los archivos “HDF” se procedió a extraer los datos de los SDS, los cuales vienen a ser los parámetros requeridos para la aplicación del trabajo. Para este caso se usó el programa Panoply como se puede observar en la Figura N°13, programa donde se puede visualizar los SDS que contiene cada archivo “HDF” y la data que se encuentra dentro de la misma descargada del EARTHDATA SEARCH. Es en Panoply donde se eligieron los SDS que fueron usados para el estudio, también se tuvo en cuenta los Quality Flag y las coordenadas a las cuales se localizan.

The screenshot shows the Panoply software interface. The main window displays a list of SDS (Short Name, Long Name, Type) for the file 'MYD04\_3K.A2019001.1900.061.2019002152737'. The list includes various parameters such as Aerosol Cloud Fraction, Angstrom Exponent, Asymmetry Factor, Backscattering Ratio, and Optical Depth. The right-hand pane shows the variable 'Optical\_Depth\_Land\_And\_Ocean' with its full name and a detailed description of the data, including units and scale factors.

Figura N°13: Visualizador de SDS's y datos en Panoply.  
Fuente: (Panoply, 2021).

Los SDS elegidos para los archivos MYD04\_3K fueron: “Optical Depth Land and Ocean”, “Imagine Optical Depth Land and Ocean”, “Land Sea Flag” y “Land Ocean Quality Flag”.

Para el caso de los archivos MYD04\_L2 y MOD04\_L2 en Dark Target, los SDS elegidos son: “Optical Depth Land and Ocean”, “Imagine Optical Depth Land and Ocean” y “Land Ocean Quality Flag”.

Y, para el caso de los archivos MYD04\_L2 y MOD04\_L2 en Deep Blue, los SDS elegidos fueron: “Deep Blue Aerosol Optical Depth 550 Land Best Estimate”, “Deep Blue Aerosol Optical Depth 550 Land QA Flag” y “Deep Blue Aerosol Optical Depth 550 Land”.

Estos SDS seleccionados se configuran en un script, el cual fue descargado de la página de administración de la NASA, y la ayuda de la herramienta de programación se quiso extraer a un modo más simple de lectura el cual es el archivo “txt”. Sin embargo, se tuvieron que aplicar algunos ajustes al script descargado con la finalidad de configurar la descarga a requerimientos específicos.

Se reunió todos los archivos “HDF” en una carpeta junto a un archivo “txt” el cual contiene la descripción de todos los archivos descargados con nombre “fileList”, tal y como se observa en la figura N°14; así mismo, el script con las modificaciones listas para ejecutar tiene una extensión “py”, tal y como se observa en la figura N°15, para se pueda ejecutar la conversión de archivos “HDF” a “txt”.

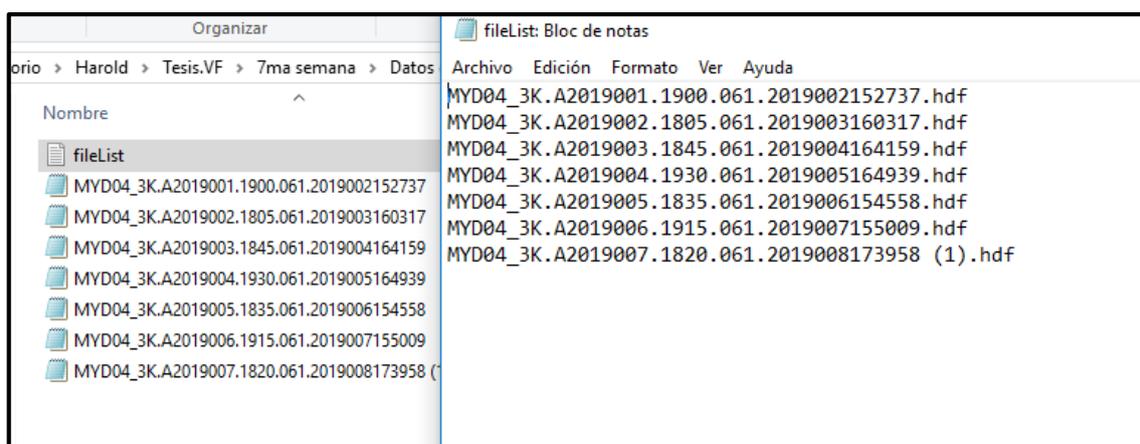


Figura N°14: Descripción del contenido en el “fileList.txt”.

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
fileList	19/10/2020 02:54 ...	Documento de tex...	1 KB
MYD04_3K.A2019001.1900.061.2019002152737	19/10/2020 01:23 ...	Archivo HDF	7,110 KB
MYD04_3K.A2019002.1805.061.2019003160317	19/10/2020 01:23 ...	Archivo HDF	4,651 KB
MYD04_3K.A2019003.1845.061.2019004164159	19/10/2020 01:22 ...	Archivo HDF	6,110 KB
MYD04_3K.A2019004.1930.061.2019005164939	19/10/2020 01:22 ...	Archivo HDF	11,385 KB
MYD04_3K.A2019005.1835.061.2019006154558	19/10/2020 01:22 ...	Archivo HDF	5,267 KB
MYD04_3K.A2019006.1915.061.2019007155009	19/10/2020 01:22 ...	Archivo HDF	10,098 KB
MYD04_3K.A2019007.1820.061.2019008173958 (1)	19/10/2020 01:22 ...	Archivo HDF	6,288 KB
read_mod_aerosol_and_dump_ascii (6)	2/03/2021 10:21 am	Python File	6 KB

Figura N°15: Requisitos de archivos para correr el script de Python “py”.

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

El contenido del script para ejecutar el cambio de archivos “HDF” a “txt” es punto principal para extraer los datos de cada archivo, es por eso que se presenta a continuación en la Figura N°16 el contenido del script con los cambios que se necesitaron para ejecutarlo.

```

FILE_NAME + '\n\n(Y/N)')"
    user_input = "Y"
    if(user_input == 'N' or user_input == 'n'):
        continue
    else:
        if '3K' in FILE_NAME: #then this is a 3km MODIS file
            print('This is a 3km MODIS file. Saving... ')
            #saves all the SDS to be outputted to ASCII in a
dictionary

            dataFields=dict([(1, 'Optical_Depth_Land_And_Ocean'), (2, 'Im
age_Optical_Depth_Land_And_Ocean'), (3, 'Land_sea_Flag'), (4, 'Land_
Ocean_Quality_Flag')])
            # The name of the SDS to read
            elif 'L2' in FILE_NAME: #Same as above but for 10km
MODIS file
                print('This is a 10km MODIS file. Saving... ')

                dataFields=dict([(1, 'Deep_Blue_Aerosol_Optical_Depth_550
_Land_Best_Estimate'), (2, 'Deep_Blue_Aerosol_Optical_Depth_550
_Land_QA_Flag'), (3, 'Deep_Blue_Aerosol_Optical_Depth_550_Land')])
            else:
                print('The file :',FILE_NAME, ' is not a valid
MODIS file (or is named incorrectly). \n')
                continue
            try:
                # open the hdf file for reading
                hdf=SD.SD(FILE_NAME)
            except:
                print('Unable to open file: \n' + FILE_NAME +
'\n Skipping...')
                continue

```

Figura N°16: Contenido del script para convertir de HDF a txt.

Fuente: (Senamhi, 2020).

Una vez se ejecutó el script con los archivos "HDF", el fileList en "txt" y el script en extensión "py" con la descripción de los SDS a extraer; se obtuvo un archivo en "txt" por cada archivo "HDF" existente tal y como se observa en la Figura N°17.

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
MYD04_L2.A2015354.1925.061.2018054230332	28/02/2021 11:52 ...	Archivo HDF	3,397 KB
MYD04_L2.A2015354.1925.061.2018054230332	2/03/2021 10:45 am	Documento de tex...	2,635 KB
MYD04_L2.A2015355.1830.061.2018054223147	28/02/2021 11:52 ...	Archivo HDF	2,587 KB
MYD04_L2.A2015355.1830.061.2018054223147	2/03/2021 10:45 am	Documento de tex...	2,589 KB
MYD04_L2.A2015356.1910.061.2018054225358	28/02/2021 11:52 ...	Archivo HDF	2,422 KB
MYD04_L2.A2015356.1910.061.2018054225358	2/03/2021 10:45 am	Documento de tex...	2,593 KB
MYD04_L2.A2015357.1815.061.2018054233753	28/02/2021 11:52 ...	Archivo HDF	2,513 KB
MYD04_L2.A2015357.1815.061.2018054233753	2/03/2021 10:45 am	Documento de tex...	2,590 KB
MYD04_L2.A2015358.1900.061.2018055001549	28/02/2021 11:52 ...	Archivo HDF	2,372 KB
MYD04_L2.A2015358.1900.061.2018055001549	2/03/2021 10:45 am	Documento de tex...	2,545 KB
MYD04_L2.A2015359.1805.061.2018054231836	28/02/2021 11:52 ...	Archivo HDF	1,647 KB
MYD04_L2.A2015359.1805.061.2018054231836	2/03/2021 10:45 am	Documento de tex...	2,536 KB
MYD04_L2.A2015360.1845.061.2018054235254	28/02/2021 11:52 ...	Archivo HDF	1,531 KB
MYD04_L2.A2015360.1845.061.2018054235254	2/03/2021 10:45 am	Documento de tex...	2,558 KB
MYD04_L2.A2015361.1930.061.2018055001115	28/02/2021 11:52 ...	Archivo HDF	2,294 KB
MYD04_L2.A2015361.1930.061.2018055001115	2/03/2021 10:45 am	Documento de tex...	2,596 KB
MYD04_L2.A2015362.1835.061.2018055033029	28/02/2021 11:52 ...	Archivo HDF	2,455 KB
MYD04_L2.A2015362.1835.061.2018055033029	2/03/2021 10:45 am	Documento de tex...	2,587 KB
MYD04_L2.A2015363.1915.061.2018055095400	28/02/2021 11:52 ...	Archivo HDF	2,615 KB
MYD04_L2.A2015363.1915.061.2018055095400	2/03/2021 10:45 am	Documento de tex...	2,594 KB
MYD04_L2.A2015364.1820.061.2018055094816	28/02/2021 11:52 ...	Archivo HDF	2,955 KB
MYD04_L2.A2015364.1820.061.2018055094816	2/03/2021 10:45 am	Documento de tex...	2,596 KB
MYD04_L2.A2015365.1905.061.2018055104420	28/02/2021 11:52 ...	Archivo HDF	2,299 KB
MYD04_L2.A2015365.1905.061.2018055104420	2/03/2021 10:46 am	Documento de tex...	2,576 KB

Figura N°17: Archivos “txt” generados al finalizar la ejecución del script de extensión “py”.

Fuente: (Senamhi, 2020).

También se ejecutó un script más para realizar un filtro final a los datos de productos satelitales, donde se tuvo en cuenta las coordenadas específicas que abarca la provincia de Lima, Quality Flag y datos no obtenidos por el instrumento (-9999).

Una vez obtenido los archivos “txt” se procede a ejecutar un último script, Figura N°18, como se mencionó en el párrafo anterior, en la cual se realizó un filtro final de los datos con las siguientes características:

- Eliminar los valores de “Deep Blue Aerosol Optical Depth 550 Land Best Estimate” = -9999, donde no hubo lectura del sensor.
- Mantener los valores de latitud que están en el rango de -12.5932 a -11.5224 en coordenadas geográficas.
- Mantener los valores de longitud que están en el rango de -77.5222 a -76.4158 en coordenadas geográficas.
- Eliminar los valores de “Deep Blue Aerosol Optical Depth 550 Land QA Flag” = 0 y 1.

```

df = pd.read_csv(filename, sep=";", skiprows=range(1))

df.columns=["Year", "Month", "Day", "Hour", "Minute", "Second", "Latitude", "Longitude", "Deep_Blue_Aerosol_Optical_Depth_550_Land_Best_Estimate", "Deep_Blue_Aerosol_Optical_Depth_550_Land_QA_Flag", "Deep_Blue_Aerosol_Optical_Depth_550_Land"]
# eliminar una fila , df.drop([0,1],axis=0) , una columna
df.drop(['year'], axis=1) , del df['Hour']
#del df['Hour' ]
#del df['Minute' ]
del df['Second' ]
#del df ['Deep_Blue_Aerosol_Optical_Depth_550_Land' ]
#del df['AOD_550_Dark_Target_Deep_Blue_Combined_QA_Flag' ]
#del df['AOD_550_Dark_Target_Deep_Blue_Combined']

df = df.reset_index(drop=True)

linea = len(df.index)
df = df.drop(df[df['Deep_Blue_Aerosol_Optical_Depth_550_Land_Best_Estimate'] == -9999].index)
df = df.drop(df[df['Latitude']<-12.5932].index)
df = df.drop(df[df['Latitude']>-11.5224].index)
df = df.drop(df[df['Longitude']>-76.4158].index)
df = df.drop(df[df['Longitude']<-77.5222].index)
#for i in range(0, linea):
#    #print (df.iat[i,4])
#    #if -77.5222 < df.iat[i,4] <-76.4158:
#        df.drop([i],inplace=True)

```

Figura N°18: Contenido del script para filtrar los datos obtenidos.

Fuente: (Senamhi, 2020).

Finalmente se generó el archivo en Excel, Figura N°19, importando los archivos “txt” filtrado donde se observó que contienen los datos de fecha, latitud, longitud, AOD y Qualityt Flag. Con estos datos se tiene la finalidad de ser cargados en el programa ArcGIS y obtener representación espacial y temporal.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Year	Month	Day	Hour	Minute	Latitude	Longitude	Optical_Depth_550	Optical_Depol	Optical_Depth_550_Land		
0	2015	1	3	15	41	-11.5481	-77.0296	0.017000001	3	0.017		
1	2015	1	3	15	41	-11.5624	-76.9273	0.018000001	2	0.018		
2	2015	1	3	15	41	-11.652	-76.9432	0.018000001	2	0.018		
3	2015	1	3	15	41	-12.2472	-76.6212	0.018000001	3	0.018		
4	2015	1	3	15	41	-12.3367	-76.6373	0.018000001	2	0.018		
5	2015	1	3	15	41	-12.3518	-76.5263	0.018000001	3	0.018		
6	2015	1	3	15	41	-12.4262	-76.6544	0.018000001	2	0.018		
7	2015	1	3	15	41	-12.4409	-76.5461	0.018000001	2	0.018		
8	2015	1	3	15	41	-12.5307	-76.5601	0.018000001	2	0.018		
9	2015	1	3	15	41	-12.5455	-76.4511	0.018000001	3	0.018		
10	2015	1	5	15	28	-11.5501	-77.0565	0.023000001	3	0.023		
11	2015	1	5	15	28	-11.5639	-76.9643	0.019000001	3	0.019		
12	2015	1	5	15	28	-11.6391	-77.0764	0.018000001	3	0.018		
13	2015	1	5	15	28	-11.653	-76.9842	0.018000001	3	0.018		
14	2015	1	5	15	28	-11.7422	-77.0039	0.044000002	2	0.044		
15	2015	1	5	15	28	-11.756	-76.9118	0.017000001	2	0.017		
16	2015	1	5	15	28	-11.8312	-77.0244	0.105000005	2	0.105		
17	2015	1	5	15	28	-11.8588	-76.8401	0.155000007	2	0.155		
18	2015	1	5	15	28	-11.9343	-76.9517	0.025000001	3	0.025		
19	2015	1	5	15	28	-11.948	-76.86	0.062000003	3	0.062		

Figura N°19: Ejemplo de datos filtrados por fecha, AOD y Quality Flag.

Fuente: (Senamhi, 2020).

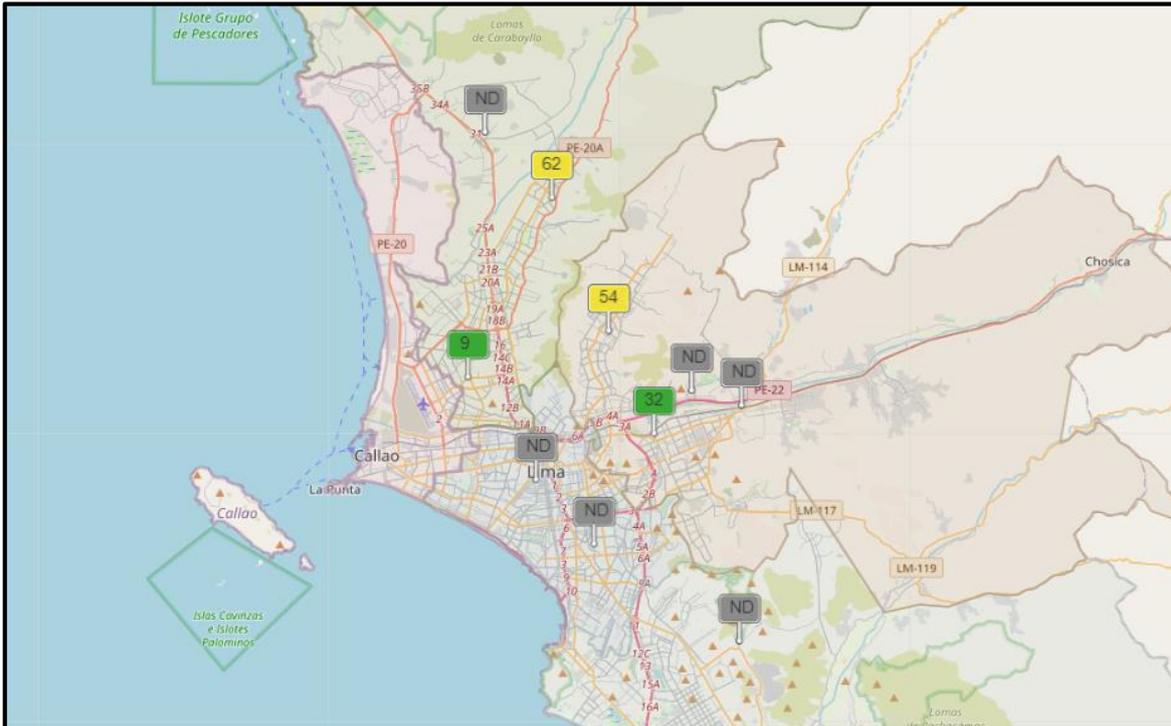
De la misma manera como se realizó el procedimiento para extraer los productos satelitales del instrumento MODIS a bordo de los satélites AQUA y TERRA, se aplica para el instrumento VIIRS a bordo del satélite S-NPP. Sin embargo, el único cambio que se realizó es en la base de datos para adquirir los archivos con extensión “nc” (para el instrumento MODIS los archivos fueron “HDF”).

Para ejecutar los archivos de extensión “nc” la búsqueda que se realizó fue en la base de datos de Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System Distributed Active Archive Center (LAADS DAAC), el cual también está bajo administración de la NASA, de tal manera que se obtienen las extensiones “nc”; luego, con la herramienta de programación, usando Visual Studio Code, se ejecuta para convertir los archivos de extensión “nc” a “csv”; posteriormente se ejecuta el último script con la herramienta de programación en la cual se filtró las características de coordenadas, valores no obtenidos por los instrumentos de -9999 y los Quality Flag, obteniendo así datos de fecha, latitud, longitud, AOD y Quality Flag.

### 3.1.2. Datos observados de calidad del aire

Los datos de las estaciones de calidad de aire y meteorológicas provienen del SENAMHI, el cual tiene a su cargo estaciones de monitoreo abarcando una extensión en la provincia de Lima. A continuación, se detallan las estaciones de monitoreo, así como los parámetros que mide cada una de ellas.

Se presenta a continuación en la **Figura N°20**, un mapa de las 10 estaciones de calidad de aire repartidas en diferentes distritos de la provincia de Lima con las que cuenta el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).



Así mismo, en la **Tabla N°03** se detalla las coordenadas, abreviaciones, distritos y altitudes a las cuales se encuentran las estaciones de calidad de aire en la provincia de Lima.

**Tabla N°03.** Detalles de las estaciones de calidad de aire en la provincia de Lima

Abreviatura	Estación	Distrito	Longitud	Latitud	Altitud
ATE	ATE	ATE	76°55'W''	12°01'S''	362 m s.n.m.
SBJ	San Borja	San Borja	77°00'W''	12°06'S''	136 m s.n.m.
CDM	Campo de Marte	Jesús María	77°02'W''	12°04'S''	123 m s.n.m.
STA	Santa Anita	Santa Anita	76°58'W''	12°02'S''	276 m s.n.m.
VMT	Villa María del Triunfo	Villa María del Triunfo	76°55'W''	12°09'S''	292 m s.n.m.
HCH	Huachipa	San Juan de Lurigancho	76°56'W''	12°01'S''	294 m s.n.m.
SJL	San Juan de Lurigancho	San Juan de Lurigancho	76°59'W''	12°01'S''	239 m s.n.m.
SMP	San Martín de Porres	San Martín de Porres	77°05'W''	12°00'S''	56 m s.n.m.
CRB	Carabayllo	Carabayllo	77°02'W''	11°54'S''	190 m s.n.m.
PPD	Puente Piedra	Puente Piedra	77°04'W''	11°51'S''	180 m s.n.m.

Fuente: (Senamhi, 2020)

Los parámetros que mide el SENAMHI en cada una de las estaciones de calidad de aire son reportados en base horaria, los cuales fueron usados a manera de análisis para la presente investigación. A continuación, se detalla los parámetros de medición de las estaciones, así como sus características y métodos de medición como se puede apreciar en la **Tabla N°04** y **Tabla N°05**.

**Tabla N°04.** Ejemplo de parámetros y concentraciones de la estación de calidad de aire "Carabayllo"

Estación: CARABAYLLO							
Dirección: Piscina Municipal de Carabayllo, Av. Micaela Bastidas Cdra 04, Urb. Santa Isabel							
Coordenadas: Lat: 11°54'7.9" S Long: 77°2'1.1" W – Alt: 190 msnm.							
Ver Ficha		Concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		Estados		Estadísticos	
Fecha	Hora	$PM_{2.5}$	$PM_{10}$	$SO_2$	$NO_2$	$O_3$	CO
08/06/2020	22:00	6.32	37.46	23.58	4.69	0.54	1146.55
08/06/2020	21:00	7.89	43.73	23.74	8.17	0.14	1176.45
08/06/2020	20:00	3.54	43.31	23.66	14.41	0.08	1261.55
08/06/2020	19:00	6.47	39.34	23.79	20.21	0.08	1334.00
08/06/2020	18:00	15.63	46.89	23.71	21.90	0.08	1348.95
08/06/2020	17:00	25.42	74.85	23.89	16.26	2.14	1276.50
08/06/2020	16:00	28.70	83.50	23.97	8.38	7.59	1174.15
08/06/2020	15:00	27.02	92.30	24.21	7.74	12.56	1194.85
08/06/2020	14:00	25.93	86.20	24.24	6.88	13.89	1186.80
08/06/2020	13:00	27.14	94.40	24.39	8.82	12.50	1217.85
08/06/2020	12:00	21.79	104.80	24.39	9.61	8.80	1248.90
08/06/2020	11:00	20.60	95.90	24.34	9.91	4.40	1269.60

Fuente: (Senamhi, 2020).

**Tabla N°05.** Técnicas, métodos y registros de los parámetros de calidad de aire, ejemplo en la estación "Carabayllo"

Parámetros contaminantes	Fecha primer registro	Fecha último registro	Método	Técnica	Marca
Material Particulado menor a 10 micras ( $PM_{10}$ )	03/12/2014	08/06/2020	Automático	Atenuación de Rayos Beta Monitor 5014i	THERMO SCIENTIFIC
Material Particulado menor a 2.5 micras ( $PM_{2.5}$ )	03/12/2014	08/06/2020	Automático	Atenuación de Rayos Beta Monitor 5014i	THERMO SCIENTIFIC
Dióxido de Azufre ( $SO_2$ )	03/12/2014	08/06/2020	Automático	Fluorescencia UV Analizador T100	TELEDYNE
Óxidos de nitrógeno ( $NO_2$ )	03/12/2014	08/06/2020	Automático	Quimioluminiscencia Analizador T200	TELEDYNE
Monóxido de carbono (CO)	03/12/2014	08/06/2020	Automático	Infrarrojo No Dispersivo Analizador T300	TELEDYNE
Ozono troposférico ( $O_3$ )	03/12/2014	08/06/2020	Automático	Fotometría UV Analizador T400	TELEDYNE

Fuente: (Senamhi, 2020).

En la **Tabla N°06** se presentan los parámetros meteorológicos, frecuencia de medición y características técnicas y de medición que presentan la estación de meteorología en el distrito de Carabayllo.

**Tabla N°06.** Técnicas, métodos y registros de los parámetros meteorológicos, ejemplo en la estación "Carabayllo"

Parámetro meteorológico	Frecuencia	Altura de medición	Fecha primer registro	Fecha último registro	Técnica de medición	Marca
Temperatura ambiente (Temperatura °C)	Horario	1m	-	08/06/2020	Automático	VAISALA
Velocidad del viento (Vel. viento – m/s)	Horario	1m	-	08/06/2020	Automático	VAISALA
Dirección del viento (Dr. Viento - °)	Horario	1m	-	08/06/2020	Automático	VAISALA
Humedad relativa del aire (Humedad relativa - %)	Horario	1m	-	08/06/2020	Automático	VAISALA
Precipitación	Horario	1m	-	08/06/2020	Automático	VAISALA

Fuente: (Senamhi, 2020).

La forma de recolección de los datos antes mencionados se tramitó mediante Acceso a la información pública de manera virtual según el expediente N° 2388 donde se brindó los datos de los siguientes parámetros con una base de datos desde enero de 2015 a diciembre de 2019:

- Material Particulado menor a 10 micras,  $PM_{10}$  ( $ug/m^3$ )
- Material Particulado menor a 2.5 micras,  $PM_{2.5}$  ( $ug/m^3$ )
- Dióxido de azufre,  $SO_2$  ( $ug/m^3$ )
- Dióxido de nitrógeno,  $NO_2$  ( $ug/m^3$ )
- Monóxido de carbono,  $CO$  ( $ug/m^3$ )
- Ozono,  $O_3$  ( $ug/m^3$ )
- Temperatura medio (°C)
- Humedad Relativa (%)
- Precipitación (mm)
- Velocidad de viento (m/s)
- Dirección de viento (°)

Así mismo, se brindó los parámetros anteriores de las siguientes estaciones:

- Estación "ATE"
- Estación "San Borja"
- Estación "Campo de Marte"
- Estación "Santa Anita"
- Estación "Villa María del Triunfo"
- Estación "Huachipa"
- Estación "San Juan de Lurigancho"
- Estación "San Martín de Porres"
- Estación "Carabayllo"
- Estación "Puente Piedra"

Finalmente se realizó un tratamiento a los datos para obtener el promedio de manera diaria para los parámetros de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , Temperatura, Humedad Relativa y Velocidad de viento.

### 3.2. Representatividad temporal y espacial

La representación temporal consta de la elaboración de series de tiempo usando en programa Minitab en la versión 19 para los conjuntos de datos de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , Temperatura, Humedad Relativa, Precipitación, Velocidad de viento, AOD-AQUA Dark Target con resolución 10Km, AOD-AQUA Deep Blue con resolución 10Km, AOD-TERRA Dark Target con resolución 10Km, AOD-TERRA Deep Blue con resolución 10Km, AOD-VIIRS Deep Blue y AOD-VIIRS Dark Target para las diez estaciones que se contempló en el estudio y con Buffers de 1kmx1km, 3kmx3km y 10kmx10km para los productos satelitales.

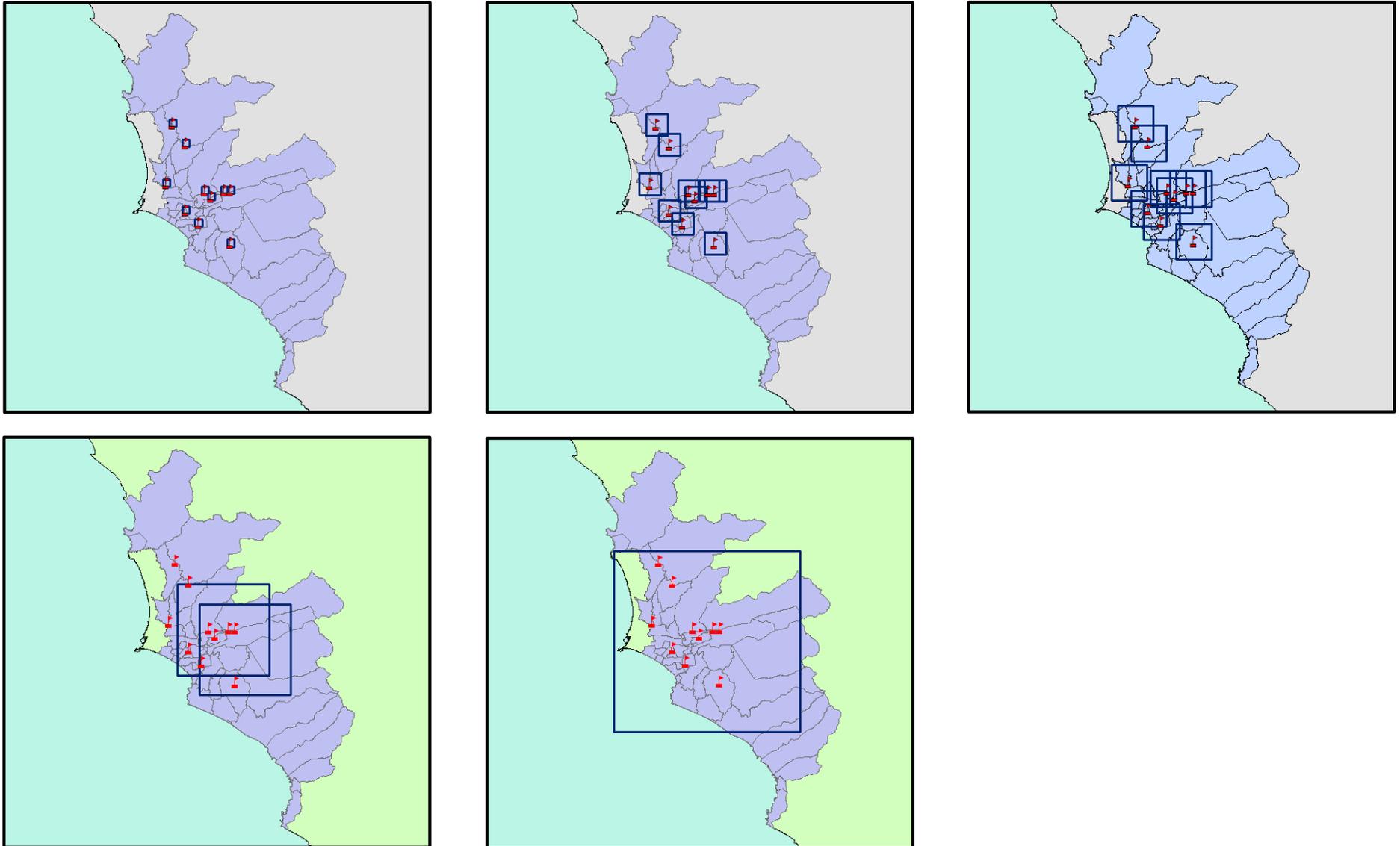
En el caso de la representación espacial, se realizó la elaboración de mapas de distribución de datos, usando el programa ArcGIS para los productos AOD-AQUA Dark Target con resolución 10Km, AOD-AQUA Deep Blue con resolución 10Km, AOD-TERRA Dark Target con resolución 10Km, AOD-TERRA Deep Blue con resolución 10Km, AOD-VIIRS Deep Blue y AOD-VIIRS Dark Target; a todas las distribución antes mencionadas también se le aplicó un Buffer de 1kmx1km, 3kmx3km y 10kmx10km teniendo en cuenta las diez estaciones de calidad del aire que presenta el área de estudio.

El proceso inició una vez obtenido los datos de los productos satelitales en archivos "CSV", los cuales se importaron al programa ArcGIS donde se le añadieron los mapas de la provincia de Lima, así como sus distritos. Luego se añadieron las coordenadas de las estaciones de calidad de aire en el área de estudio y se crearon Buffers cuadrados de 1kmx1km, 3kmx3km y 10kmx10km para cada estación, con la finalidad de que se realice una delimitación de los datos de productos satelitales (AQUA, TERRA y SUOMI NPP en combinación con los algoritmos Dark Target y Deep Blue) y puedan representar a las estaciones en mención, como se puede observar en la **Figura N°21**.

Así mismo, se ejecutaron mapas con dominios de 25kmx25km (2 dominios) siendo el dominio N°1 una representación de las estaciones "ATE", "San Borja", "Campo de Marte", "Santa Anita", "Huachipa" y "San Juan de Lurigancho"; mientras que el dominio N°2 representa a las estaciones "ATE", "San Borja", "Santa Anita", "Villa María del Triunfo", "Huachipa" y "San Juan de Lurigancho"; y un dominio de 50kmx50km el cual abarcó a todas las estaciones.

De la Figura N° 21 se puede observar que el mapa "a" representa los buffers cuadrados de 1kmx1km creados con centro en la ubicación de cada estación de calidad de aire. El mapa "b" representa los buffers de 3kmx3km creados con centro en cada estación de calidad de aire. El mapa "c" representa los buffers de 10kmx10km creados alrededor de cada estación en tierra.

Finalmente el mapa "d" representa a los dominios de 25kmx25km, los cuales abarcan 06 estaciones de calidad de aire cada una; y el mapa "e" representa al dominio de 50kmx50km el cual abarca todas las estaciones de calidad de aire que se tiene en Lima Metropolitana.



a) Buffer 1kmx1km    b) Buffer 3kmx3km    c) Buffer 10kmx10km    d) Buffer 25kmx25km    e) Buffer 50kmx50km

Figura N°21: Buffer de 1kmx1km, 3kmx3km, 10kmx10km, 25kmxkm y 50kmx50km en las estaciones del SENAMHI"

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

### 3.3. Integración de información satelital y base de datos observados en tierra

La integración de los datos de productos satelitales y de datos observados de tierra se realizó usando el programa de Microsoft Excel, donde se realizó el promedio diario, la desviación estándar de los datos horarios de 24 horas y el número de datos que se tiene de cada parámetro para las 24 horas de medición por los equipos; esto se aplicó para los datos observados en tierra de las diez estaciones de calidad de aire ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) así como para los parámetros meteorológicos de Temperatura, Humedad Relativa, Precipitación y Velocidad de Viento.

En el caso de la integración de los datos de productos satelitales, se procedió con la delimitación del AOD teniendo en cuenta los buffers generados en cada estación (1kmx1km, 3kmx3km y 10kmx10km).

Para una primera integración de datos, se establecieron un conjunto de 33 bases de datos donde se procede a detallar el contenido de cada una de las bases como subconjunto:

- Diez (10) bases de datos de periodo diario del 2015 al 2019 de los parámetros AOD Dark Target (MODIS-AQUA, MODIS-TERRA y VIIRS) – AOD Deep Blue (MODIS-AQUA, MODIS-TERRA y VIIRS) -  $PM_{10}$  -  $PM_{2.5}$  – Temperatura - Humedad Relativa – Precipitación – Velocidad de Viento para las estaciones de calidad de aire: “ATE”, “San Borja”, “Campo de Marte”, “Santa Anita”, “Villa María del Triunfo”, “Huachipa”, “San Juan de Lurigancho”, “San Martín de Porres”, “Carabayllo” y “Puente Piedra”; teniendo en cuenta que para los datos de productos satelitales se aplicó un Buffer de 1kmx1km en forma cuadrada con centro en las coordenadas de las estaciones.
- Diez (10) bases de datos de periodo diario del 2015 al 2019 de los parámetros AOD Dark Target (MODIS-AQUA, MODIS-TERRA y VIIRS) – AOD Deep Blue (MODIS-AQUA, MODIS-TERRA y VIIRS) -  $PM_{10}$  -  $PM_{2.5}$  – Temperatura - Humedad Relativa – Precipitación – Velocidad de Viento para las estaciones de calidad de aire: “ATE”, “San Borja”, “Campo de Marte”, “Santa Anita”, “Villa María del Triunfo”, “Huachipa”, “San Juan de Lurigancho”, “San Martín de Porres”, “Carabayllo” y “Puente Piedra”; teniendo en cuenta que para los datos de productos satelitales se aplicó un Buffer de 3kmx3km en forma cuadrada con centro en las coordenadas de las estaciones.
- Diez (10) bases de datos de periodo diario del 2015 al 2019 de los parámetros AOD Dark Target (MODIS-AQUA, MODIS-TERRA y VIIRS) – AOD Deep Blue (MODIS-AQUA, MODIS-TERRA y VIIRS) -  $PM_{10}$  -  $PM_{2.5}$  – Temperatura - Humedad Relativa – Precipitación – Velocidad de Viento para las estaciones de calidad de aire: “ATE”, “San Borja”, “Campo de Marte”, “Santa Anita”, “Villa María del Triunfo”, “Huachipa”, “San Juan de Lurigancho”, “San Martín de Porres”, “Carabayllo” y “Puente Piedra”; teniendo en cuenta que para los datos de productos satelitales se aplicó un Buffer de 10kmx10km en forma cuadrada con centro en las coordenadas de las estaciones.
- Dos (02) bases de datos de periodo diario del 2015 al 2019 de los parámetros AOD Dark Target (MODIS-AQUA, MODIS-TERRA y VIIRS) – AOD Deep Blue (MODIS-AQUA, MODIS-TERRA y VIIRS) -  $PM_{10}$  -  $PM_{2.5}$  – Temperatura - Humedad Relativa – Precipitación – Velocidad de Viento el cual la primera base de datos contiene el promedio de los

parámetros antes mencionados de las estaciones de calidad de aire: “ATE”, “San Borja”, “Campo de Marte”, “Santa Anita”, “Huachipa” y “San Juan de Lurigancho”; mientras que la segunda base de datos contiene el promedio de las estaciones: para las estaciones de calidad de aire: “ATE”, “San Borja”, “Santa Anita”, “Villa María del Triunfo”, “Huachipa” y “San Juan de Lurigancho”; teniendo en cuenta que para los datos de productos satelitales se aplicó un Buffer de 25kmx25km en forma cuadrada de tal forma que integró a las estaciones antes mencionadas. Tener en cuenta que para la primera base de datos tendrá un nombre de “Dominio 1”, mientras que a la segunda base de datos llamaremos “Dominio 2”.

- Una (01) base de datos de periodo diario del 2015 al 2019 de los parámetros AOD Dark Target (MODIS-AQUA, MODIS-TERRA y VIIRS) – AOD Deep Blue (MODIS-AQUA, MODIS-TERRA y VIIRS) -  $PM_{10}$  -  $PM_{2.5}$  – Temperatura - Humedad Relativa – Precipitación – Velocidad de Viento el cual contiene el promedio de los parámetros antes mencionados de las estaciones de calidad de aire: “ATE”, “San Borja”, “Campo de Marte”, “Santa Anita”, “Villa María del Triunfo”, “Huachipa”, “San Juan de Lurigancho”, “San Martín de Porres”, “Carabayllo” y “Puente Piedra”; teniendo en cuenta que para los datos de productos satelitales se aplicó un Buffer de 50kmx50km en forma cuadrada de tal forma que integró a las estaciones antes mencionadas.

Una vez obtenido las bases de datos con sus respectivos dominios, se determinó el porcentaje de disponibilidad de datos para los parámetros de AOD vs datos en tierra para cada dominio antes mencionado, esto se desarrolló con la finalidad de verificar que los porcentajes obtenidos sean de ayuda para seguir con el estudio. De esta manera se procede a determinar los dominios que serán factibles para el desarrollo del estudio.

### 3.4. Análisis estadístico de bases de datos integradas

#### 3.4.1. Test de Mann-Kendall y Pendiente de Sen

El Test de Mann- Kendall y la Pendiente de Sen permite mejorar y estimar una tendencia de series temporales de valor anual de observación empleando datos para detectar la presencia de tendencias positivas o negativas en los datos de series temporales (Mustapha, 2013).

El tratamiento de los datos se realiza con una prueba no paramétrica, el cual es la principal característica del Test de Mann-Kendall, (Thenmozhi & Kottiswaran, 2016) que se refiere al uso de tres pasos para el análisis de tendencias: Primero se detecta la presencia de tendencia creciente o decreciente usando Mann-Kendall; segundo, se estima la magnitud o pendiente de una tendencia lineal usando la pendiente de Sen no paramétrico; y finalmente se realiza un modelo de regresión (Mustapha, 2013).

**Ecuación N°01.** Ecuación del test de Mann-Kendall

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k)$$

Donde S es el valor del test de Mann-Kendall, “X(j)” y “X(k)” son los valores de los datos secuenciales; y “j”, “k” y “n” son la longitud de los datos. Se asume que el valor S es 0 (no hay tendencia), si el valor de S muestra un valor positivo (incrementado) mientras que un valor negativo de S muestra un decrecimiento en la ecuación N°5.

**Ecuación N°02.** Ecuación del test de Mann-Kendall

$$\text{sign}(x_j + x_k) = \begin{cases} (x_j - x_k) = 1 & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ (x_j - x_k) = 0 & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ (x_j - x_k) = -1 & \text{si } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

Se presenta la ecuación referente a la aplicación de la pendiente de Sen.

**Ecuación N°03.** Ecuación de la pendiente de Sen

$$Q = \frac{x_j}{j} - \frac{x_k}{k}$$

Donde Q es el valor del estimador de la pendiente de Sen; “X(j)” y “X(k)” son valores de datos en el tiempo “j” y “k”. Si hay “n” valores de “X(j)” en la serie de tiempo, el estimador de la pendiente de Sen es la mediana de “n(n-1)/2” en parejas pendientes, por lo tanto, el estimador de la pendiente de Sen se puede calcular usando la ecuación N°4.

**Ecuación N°04.** Ecuación de la pendiente de Sen como mediana

$$Q = Q \left( \binom{N+1}{2} \right) \text{ si } N \text{ es impar}$$

$$Q = \frac{1}{2} \left( Q \binom{N}{2} \right) + Q \left( \binom{N+2}{2} \right) \text{ si } N \text{ es impar}$$

### 3.4.2. Función de Densidad de Probabilidad (PDF, de sus siglas en inglés desde ahora)

La PDF menciona el comportamiento de las distribuciones que dibujan el contorno de un histograma y presenta dos requisitos:

$f(x) > 0$  para todos los valores de “x” y su integral sobre el dominio es igual a 1.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) * dx = 1 \quad \text{Para distribuciones continuas}$$

$$\sum_n f(x_n) = 1 \quad \text{Para distribuciones discretas}$$

Fuente: [\(Diez, 2016\)](#)

## 4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS

### 4.1 Representatividad temporal y espacial

La presentación de resultados inicia con las series de tiempo del Dominio 01 (25km x 25km) de datos meteorológicos y de calidad de aire del SENAMHI, las cuales se dividen por estaciones del año, en verano de color azul, otoño de color guinda, invierno de color verde y primavera de color violeta; las cuales representan ocurrencias presentadas en las estaciones del año verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente.

La Figura N°22, presenta series de tiempo de los promedios diarios de parámetros para calidad de aire (SENAMHI, 2020) representados para el dominio N°01 de 25kmx25km, se observa que para la serie de tiempo de  $PM_{10}$  (figura 22-a) hay un descenso de MP desde el inicio del verano hasta mediados de invierno, y que los valores mínimo y máximo oscilan entre  $13 \mu g/m^3$  a  $160 \mu g/m^3$ , siendo el valor mínimo que se dan en la estación de invierno en el año 2019 y el valor máximo el cual se da en la estación de otoño, del mismo año.

En el caso de la serie de tiempo que representa el  $PM_{2.5}$ , figura 22-b, se observa que los valores mínimos y máximos en promedio oscilan entre  $12 \mu g/m^3$  y  $100 \mu g/m^3$ , siendo en el año 2019 donde se presenta el mayor valor de este MP. También se visualiza que los datos donde se tiene menor valor de  $PM_{2.5}$  es en la estación de verano y es visible para todos los años del estudio, excepto en el primer año de la serie.

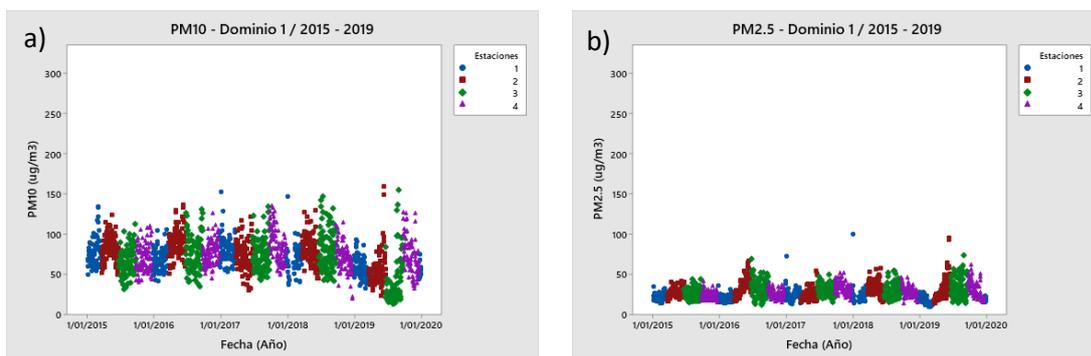


Figura N°22: Promedio diario de MP representados para el dominio 01 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a)  $PM_{10}$  y b)  $PM_{2.5}$ .

Fuente: (Elaboración propia, 2020)

En el caso del parámetro de Temperatura del Dominio 01, figura 23-a, se puede observar de manera más definida la oscilación que tienen los datos a través del periodo del 2015 al 2019, donde el máximo valor en cada año se da en la estación de verano, teniendo un descenso en otoño hasta llegar a su mínimo valor en invierno, luego en primavera inicia un ascenso en la temperatura para llegar de nuevo a su máximo valor en la estación de verano.

Lo contrario sucede con el parámetro de Humedad Relativa del Dominio 01, figura 23-b, donde los datos promediados tuvieron un intervalo entre 50% a 100% de rango y donde los máximos valores se dan en invierno, empiezan a descender en primavera hasta llegar a un mínimo en la estación de verano para luego iniciar un ascenso en otoño y llegar finalmente de nuevo a sus máximos valores en invierno. Así mismo, se aprecia una tendencia en el aumento de valores extremos por año, a excepción del año 2019.

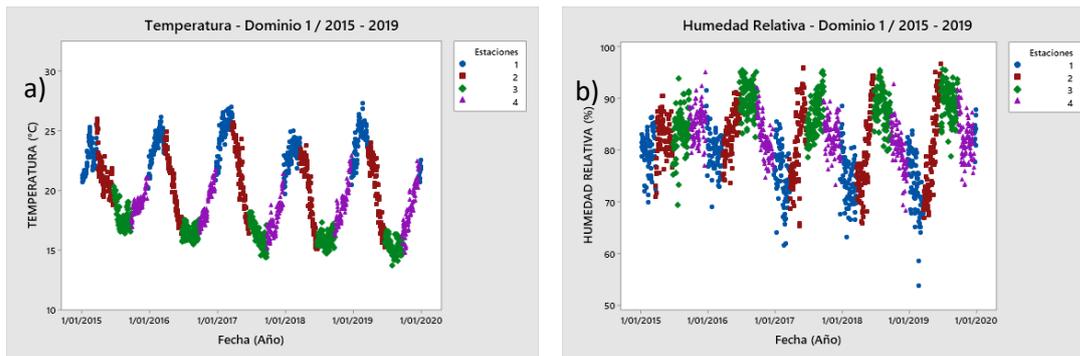


Figura N°23: Promedio diario de parámetros representados para el dominio 01 en Lima, obtenidos de SENAMHI: a) Temperatura y b) Humedad Relativa.

Fuente: (Elaboración propia, 2020)

La precipitación, tal como se observa en la figura 24-a, presenta niveles débiles, donde el máximo valor diario que se da es de 0.25mm aproximadamente para el periodo de estudio de 05 años, siendo en la mayoría del periodo de otoño valores mayores a 0.15mm en el año 2019.

Finalmente, el parámetro de velocidad de viento, figura 24-b, representado en la serie de tiempo se visualiza una oscilación notable desde inicios del 2017 hasta finales del 2019, donde sus mayores valores se dan desde inicios de primavera hasta mitad de verano para luego descender hasta llegar a sus valores mínimos a finales de otoño e inicios de invierno. Sin embargo, esta oscilación se presenta de manera más amplificada en el año 2015 y 2016, y con valores más dispersos en el año 2016. La intensidad máxima alcanzada es de vientos flojos (Brisa débil).

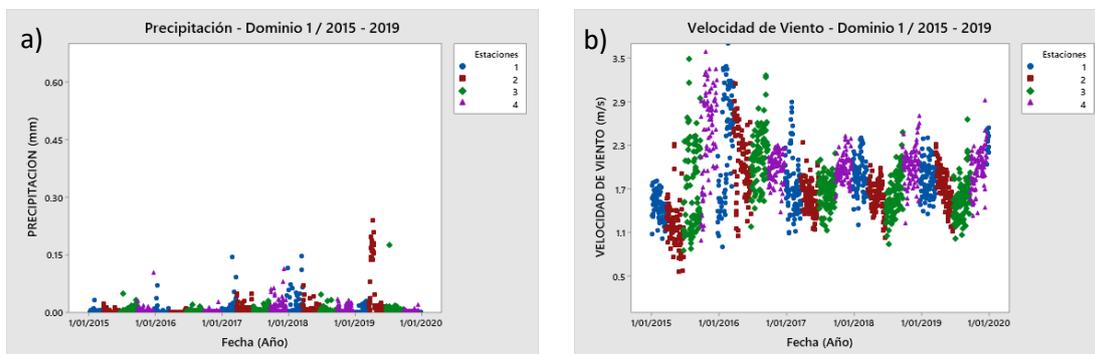


Figura N°24: Promedio diario de parámetros representados para el dominio 01 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) Precipitación y b) Velocidad de Viento.

Fuente: (Elaboración propia, 2020)

En la Figura N°25, la cual presenta series de tiempo de los promedios diarios de parámetros para calidad de aire (SENAMHI, 2020) representados para el dominio N°02 de 25kmx25km; se observa que para la serie de tiempo de  $PM_{10}$ , figura 25-a, los valores oscilan entre  $20.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $190.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; siendo los máximos, inusuales, alcanzados en dos ocasiones con valores que llegan a  $280.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; el valor mínimo se da en la estación de otoño del año 2019 y el valor máximo que se da en las estaciones de verano e invierno. Así mismo, se observa que los datos presentan una ligera oscilación fija con una amplitud aproximada de  $75.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para todo el periodo de tiempo estudiado, iniciando sus valores más altos a fines de verano e inicios de otoño para luego descender en lo que resta de otoño y llegar a sus valores mínimos en invierno; luego iniciar un ascenso de  $PM_{10}$  en primavera e inicios de verano para finalmente llegar a sus valores más altos de nuevo a fines de verano e inicios de otoño.

En el caso de la serie de tiempo que representa el  $PM_{2.5}$ , figura 25-b, se observa que los valores mínimos y máximos en promedio oscilan entre  $9.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $110.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (SENAMHI, 2020), siendo los valores máximos que se dan en la transición de la estación de otoño a invierno, siendo en el año 2019 donde se presentan los mayores valores de Material Particulado; siendo la excepción en verano del 2018, donde se presentaron valores esporádicos cercanos a  $110.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . También se visualiza que los datos donde se tiene menor valor de  $PM_{2.5}$  es en la estación de verano, siendo ésta estación donde se presentan los menores valores registrados en promedio para todo el periodo de estudio.

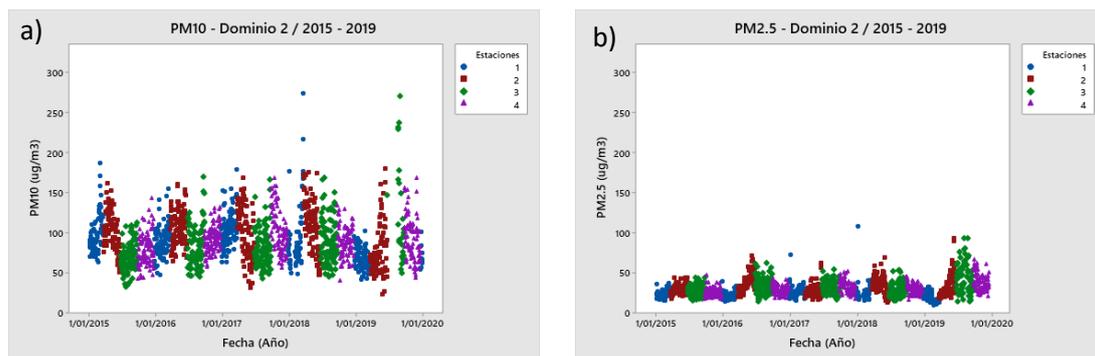


Figura N°25: Promedio diario de MP representados para el dominio 02 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a)  $PM_{10}$  y b)  $PM_{2.5}$ .

Fuente: (Elaboración propia, 2020)

En las series de tiempo para el parámetro de Temperatura, figura 26-a, se puede observar de manera más clara la oscilación que tienen los datos desde invierno del año 2016 hasta el inicio del verano en diciembre del 2019, donde el máximo valor en cada año se da en la estación de verano, de la misma manera que se dio para el Dominio N°01, en específico a la mitad de la estación de verano hasta inicios de otoño, teniendo un descenso en lo que resta de otoño hasta llegar a su mínimo valor en invierno, luego en primavera inicia un ascenso en la temperatura para llegar de nuevo a su máximo valor en la estación de verano. Los valores máximos y mínimos que se presentan en toda la serie de tiempo se da en el año 2019, con un máximo de  $30.0^\circ\text{C}$  aproximadamente y un mínimo valor próximo a  $10^\circ\text{C}$  en promedio para el Dominio N°02.

Para el parámetro de Humedad Relativa, los datos promediados tienen un intervalo entre 50% a 100%, donde los máximos valores se dan en invierno y empiezan a descender en primavera hasta llegar a un mínimo en la estación de verano para luego iniciar un ascenso en otoño y llegar finalmente de nuevo a sus máximos valores en invierno. Los valores máximos y mínimos

en promedio para el Dominio en mención, se dan en el año 2019 con un máximo próximo a 100.0% y un mínimo próximo a 50.0%, ver figura 26-b.

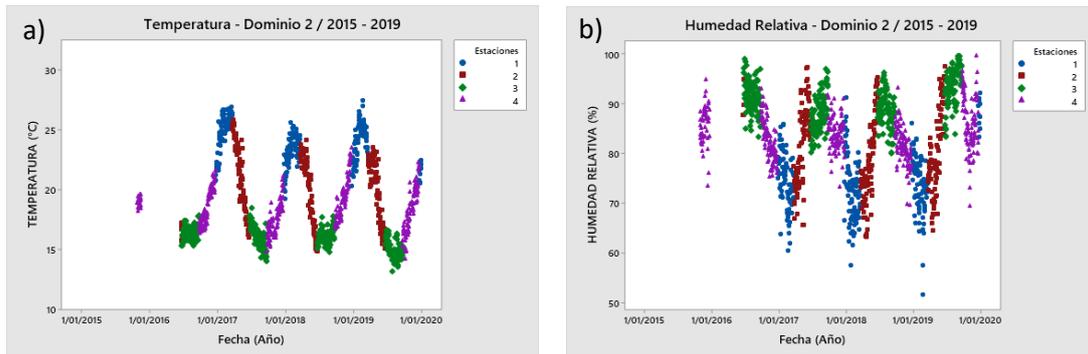


Figura N°26: Promedio diario de parámetros representados para el dominio N° 02 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) Temperatura y b) Humedad Relativa.

Fuente: (Elaboración propia, 2020)

La precipitación, figura 27-a, para el caso del Dominio N°02 en la serie de tiempo muestra valores mínimos, donde el máximo valor que se da es de 0.30mm para todo el periodo de estudio. Los mayores valores como conjunto para la serie de tiempo se dan en verano y otoño del 2018 y 2019, respectivamente. Las precipitaciones diarias de todo el periodo de 05 años evaluado presentan una intensidad débil.

Finalmente, el parámetro de velocidad de viento, figura 27-b representado en la serie de tiempo se visualiza una oscilación armónica con amplitud variable notable desde otoño del 2017 hasta finales del 2019, donde sus mayores valores se dan desde inicios de primavera hasta mitad de verano, para luego descender hasta llegar a sus valores mínimos a finales de otoño e inicios de invierno. Sin embargo, esta oscilación se presenta con velocidades más intensas en el año 2018 y 2019, con valores más dispersos en el año 2019. La intensidad máxima alcanzada es de vientos flojitos (Brisa muy débil).

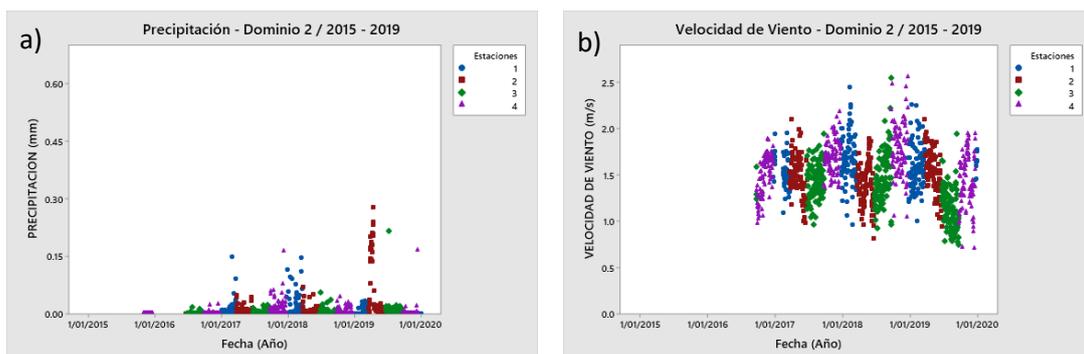


Figura N°27: Promedio diario de parámetros representados para el dominio N° 02 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) Precipitación y b) Velocidad de Viento.

Fuente: (Elaboración propia, 2020)

En la Figura N°28, la cual presenta series de tiempo de los promedios diarios de parámetros para calidad de aire (SENAMHI,2020) representados para el dominio de 50kmx50km, se observa que para la serie de tiempo de  $PM_{10}$ , figura 28-a, los valores oscilan aproximadamente entre  $10.0 \text{ ug}/\text{m}^3$  a  $170.0 \text{ ug}/\text{m}^3$ ; el valor mínimo se da en la estación de invierno del año 2019 y el valor máximo que se da en las estaciones de verano y otoño. Así mismo, se observa que los datos presentan una oscilación cuasi-armónica para todo el periodo de tiempo estudiado, iniciando un ascenso del parámetro en primavera e inicios de verano; siendo sus valores alcanzan más altos a fines de verano e inicios de otoño.

En el caso de la serie de tiempo que representa el  $PM_{2.5}$ , figura 28-b, se observa que los valores mínimos y máximos en promedio oscilan entre  $10.0 \text{ ug}/\text{m}^3$  y  $100.0 \text{ ug}/\text{m}^3$  (SENAMHI, 2020), siendo los valores máximos que se dan en la transición de la estación de otoño a invierno; sin embargo, se observa en la estación de verano para los años del 2015, 2017 y 2018, que existe un valor mayor de material Particulado el cual, cada año aumenta, siendo el del 2018 el mayor valor registrado en promedio  $100.0 \text{ ug}/\text{m}^3$ . También se visualiza que los datos donde se tiene valores mínimos de  $PM_{2.5}$  es en la estación de verano, siendo la más notable en el 2019; y con valores mayores en la estación de otoño e invierno.

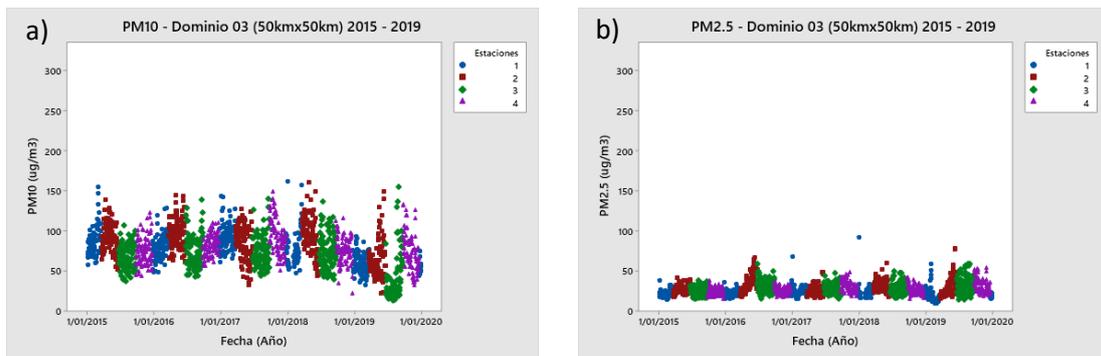


Figura N°28: Promedio diario de MP representados para el dominio “50kmx50km” en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a)  $PM_{10}$  y b)  $PM_{2.5}$ .  
Fuente: (Elaboración propia, 2020)

En las series de tiempo para el parámetro de Temperatura, figura 29-a se observa la oscilación que tienen los datos desde verano del año 2015 hasta el inicio del verano en diciembre del 2019, donde el máximo valor en cada año se da en la estación de verano hasta inicios de otoño, teniendo un descenso en lo que resta de otoño hasta llegar a su mínimo valor en invierno, luego en primavera inicia un ascenso en la temperatura para llegar de nuevo a su máximo valor en la estación de verano. Los valores máximos y mínimos que se presentan en toda la serie de tiempo se da en el año 2019, con un máximo de  $30.0^\circ\text{C}$  y un mínimo valor de  $10.0^\circ\text{C}$  en promedio. También cabe mencionar que se detecta un crecimiento en la amplitud de oscilación de los datos con el paso del tiempo.

Para el parámetro de Humedad Relativa, figura 29-b, los datos promediados tienen un intervalo con rango entre 50% a 100%, donde los máximos valores se dan en invierno y empiezan a descender en primavera hasta llegar a un mínimo en la estación de verano para luego iniciar un ascenso en otoño y llegar finalmente de nuevo a su máximo valor en invierno. El valor máximo y mínimo en promedio para el Dominio 50kmx50km se da en el año 2019 con un máximo de 100.0% y un mínimo de 50.0%. Así mismo, en el año 2019 presentan datos esporádicos mínimos.

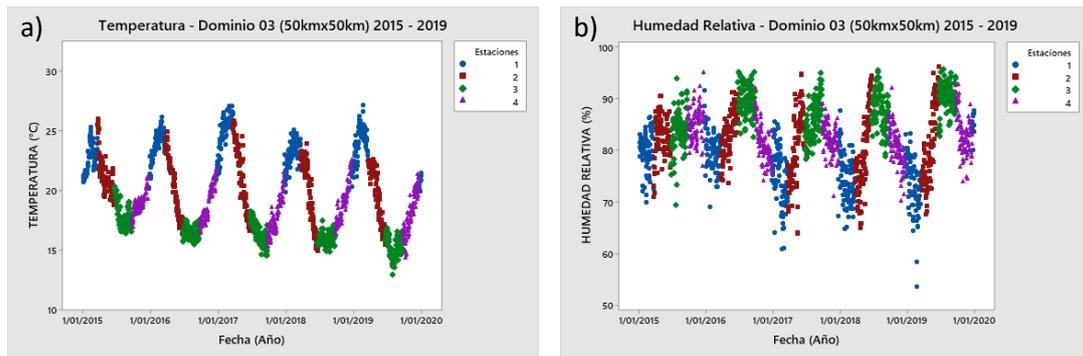


Figura N°29: Promedio diario de parámetros representados para el dominio “50kmx50km” en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) Temperatura y b) Humedad Relativa.

Fuente: (Elaboración propia, 2020)

La precipitación, figura 30-a, para el caso del Dominio 03 muestra valores de precipitación débiles, donde el máximo valor diario que se da es de 0.20mm para todo el periodo de estudio (SENAMHI, 2020). El mayor valor como conjunto para la serie de tiempo se da en verano y otoño del 2018 y 2019, respectivamente.

Finalmente, el parámetro de velocidad de viento, figura 30-b, representado en la serie de tiempo (SENAMHI, 2020), se visualiza una oscilación ligera desde otoño del 2017 hasta inicios de verano en el 2019, donde sus mayores valores se dan desde inicios de primavera hasta mitad de verano para luego descender hasta llegar a sus valores mínimos a finales de otoño e inicios de invierno. Sin embargo, esta oscilación se presenta de manera más amplificada a inicios del 2015 hasta mitad del 2016, con valores más dispersos. Por otro lado, el mínimo valor que se puede observar es en el año 2019 con un valor aproximado de 0.5 m/s, siendo el menor registrado en todo el periodo de estudio.

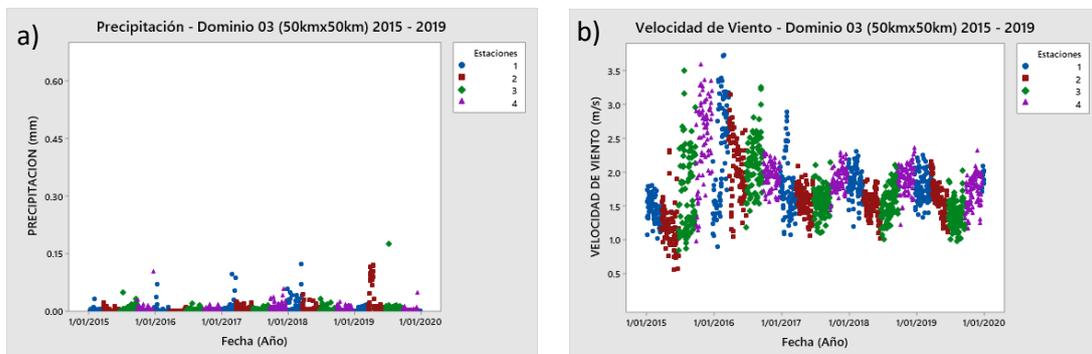


Figura N°30: Promedio diario de parámetros representados para el dominio “50kmx50km” en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) Precipitación y b) Velocidad de Viento.

Fuente: (Elaboración propia, 2020)

En la figura 31-a, se observa información satelital de AOD del satélite AQUA para el algoritmo Deep Blue en el Dominio 01, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es mayor que 0.0 S.U.A. (SIN UNIDADES ARBITRARIAS), mientras que el máximo valor próximo es de 0.7 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información para todas las estaciones del año.

En la figura 31-b, se observa información satelital de AOD del satélite TERRA para el algoritmo Deep Blue en el Dominio 01, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es mayor que 0.0 S.U.A., mientras que el máximo valor próximo es de 0.9 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe mayor información satelital para las estaciones de verano y otoño, representados por el color azul y guinda respectivamente.

En la figura 31-c, se observa información satelital de AOD del satélite SUOMI NPP para el algoritmo Deep Blue en el Dominio 01, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es mayor que 0.0 S.U.A., mientras que el máximo valor próximo es de 1.5 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe mayor información satelital para todas las estaciones, con un mayor rango de AOD, siendo los datos de inviernos lo que presentan bajo AOD para los últimos cuatro años del periodo evaluado. También, se puede observar que los rangos para los tres satélites estudiados no presentan coincidencia ni ocurrencias, siendo el satélite SUOMI NPP el que tiene una mayor amplitud a diferencia de los otros dos satélites evaluados.

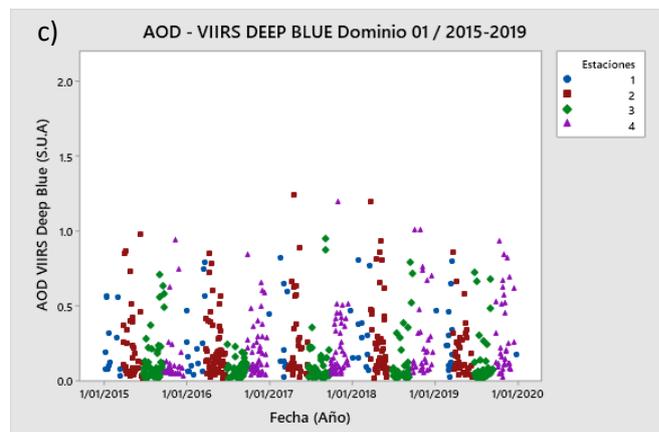
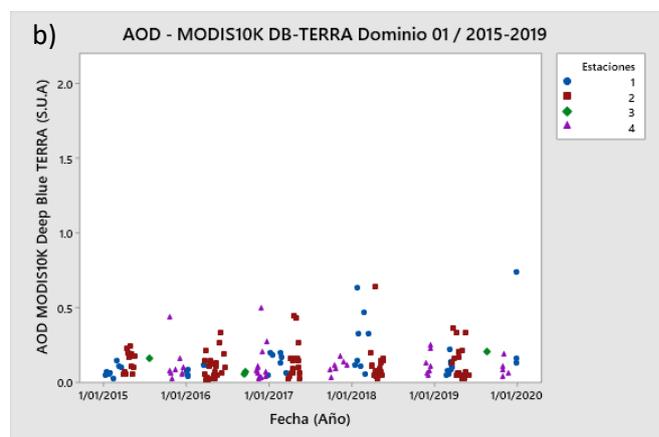
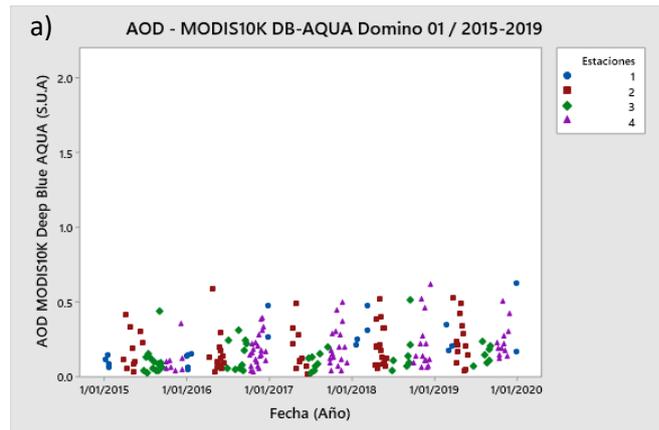


Figura N°31: Promedio diario de AOD representados para el algoritmo Deep Blue – Dominio 01 en Lima Metropolitana, obtenidos de MODIS y VIIRS:

a) AOD AQUA Deep Blue Dominio 01, b) AOD TERRA Deep Blue Dominio 01 y c) AOD VIIRS Deep Blue Dominio 01.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

En la figura 32-a, se observa información satelital de AOD del satélite AQUA para el algoritmo Dark Target en el Dominio 01, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es aproximadamente 0.2 S.U.A., mientras que el máximo valor próximo es de 1.6 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información para todas las estaciones del año, siendo en el año 2019 donde la información es rara.

En la figura 32-b, se observa información satelital de AOD del satélite TERRA para el algoritmo Dark Target en el Dominio 01, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es aproximadamente 0.2 S.U.A., mientras que el máximo valor próximo es de 1.4 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información solo de las estaciones de verano y otoño, siendo las demás estaciones donde tiene poca información para el periodo evaluado.

En la figura 32-c, se observa información satelital de AOD del satélite SUOMI NPP para el algoritmo Dark Target en el Dominio 01, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es aproximadamente 0.5 S.U.A., mientras que el máximo valor supera la escala de 2.0 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa una distribución de datos definida para el periodo evaluado, donde es solo en las estaciones de verano y otoño de data satelital, mientras que para las demás estaciones no hay información. También, se puede observar que los rangos para los tres satélites estudiados no coinciden, siendo el satélite SUOMI NPP el que tiene una mayor amplitud de oscilación a diferencia de los otros dos satélites evaluados.

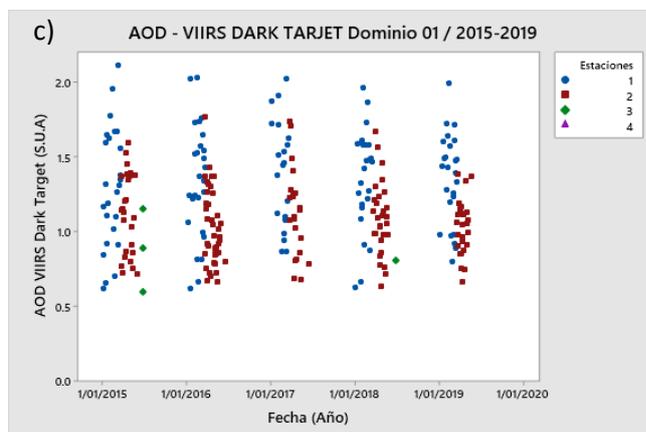
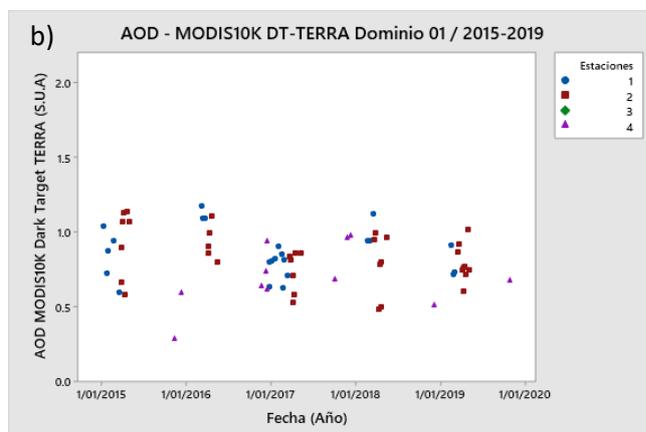
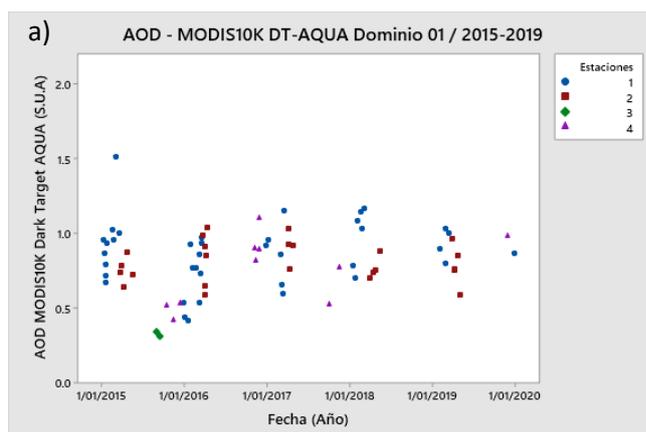


Figura N°32: Promedio diario de AOD representados para el algoritmo Dark Target – Dominio 01 en Lima Metropolitana, obtenidos de MODIS y VIIRS: a) AOD AQUA Dark Target Dominio 01, b) AOD TERRA Dark Target Dominio 01 y c) AOD VIIRS Dark Target Dominio 01.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

En la figura 33-a, se observa información satelital de AOD del satélite AQUA para el algoritmo Deep Blue en el Dominio 02, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es mayor que 0.0 S.U.A., mientras que el máximo valor próximo es de 0.8 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información continua para todas las estaciones del año.

En la figura 33-b, se observa información satelital de AOD del satélite TERRA para el algoritmo Deep Blue en el Dominio 02, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es mayor que 0.0 S.U.A., mientras que el máximo valor próximo es de 0.8 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información continua para todas las estaciones del año, siendo los datos de verano y otoño los que son más prevalentes. Las mayores ocurrencias caen debajo de la mitad del valor máximo alcanzado.

En la figura 33-c, se observa información satelital de AOD del satélite SUOMI NPP para el algoritmo Deep Blue en el Dominio 02, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es mayor que 0.0 S.U.A., mientras que el máximo valor próximo es de 1.5 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe más ocurrencias en el periodo evaluado a comparación de los dos satélites anteriores. También, se puede observar que los rangos para los tres satélites estudiados no coinciden, siendo el satélite SUOMI NPP el que tiene una mayor dispersión de sus datos a diferencia de los otros dos satélites evaluados.

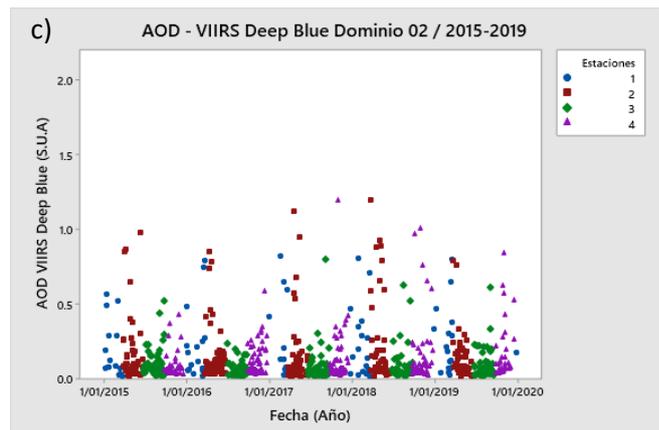
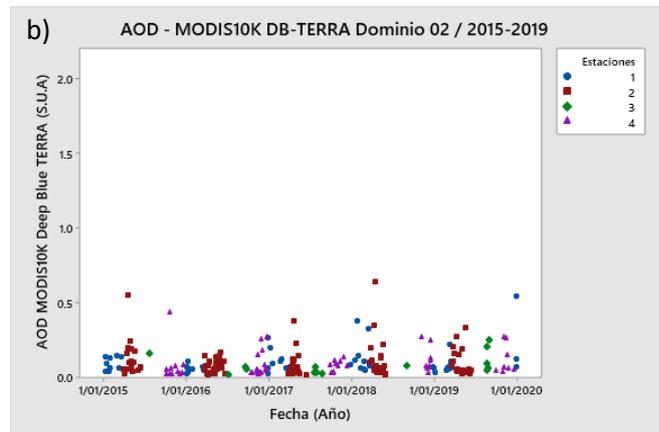
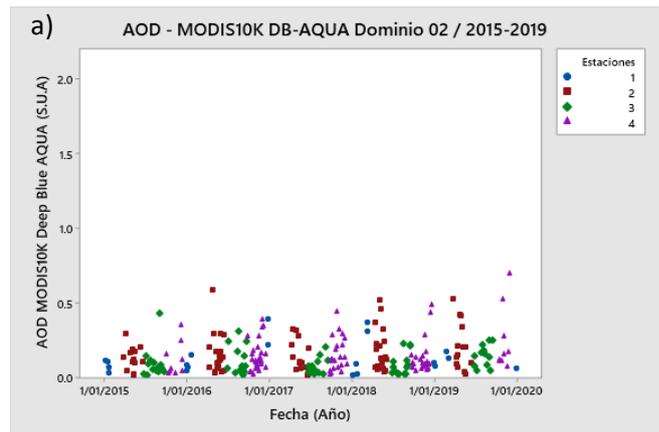


Figura N°33: Promedio diario de AOD representados para el algoritmo Deep Blue – Dominio 02 en Lima Metropolitana: a) AOD AQUA Deep Blue Dominio 02, b) AOD TERRA Deep Blue Dominio 02 y c) AOD VIIRS Deep Blue Dominio 02.  
Fuente: (Elaboración propia, 2021)

En la figura 34-a, se observa información satelital de AOD del satélite AQUA para el algoritmo Dark Target en el Dominio 02, se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es mayor que 0.0 S.U.A., mientras que el máximo valor próximo es de 1.4 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe poca información para todas las estaciones del año.

En la figura 34-b, se observa información satelital de AOD del satélite SUOMI NPP para el algoritmo Dark Target en el Dominio 02, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es aproximadamente 0.1 S.U.A., mientras que el máximo valor próximo es de 2.5 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información para todas las estaciones del año, siendo las más relevantes las obtenidas para las estaciones de verano y otoño.

En la figura 34-c, se observa información satelital de AOD del satélite TERRA para el algoritmo Dark Target en el Dominio 02, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es aproximadamente 0.1 S.U.A., mientras que el máximo valor próximo es de 1.3 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información para todas las estaciones del año. También, se puede observar que los rangos para los tres satélites estudiados no coinciden, siendo el satélite SUOMI NPP el que tiene una mayor dispersión de sus datos a diferencia de los otros dos satélites evaluados.

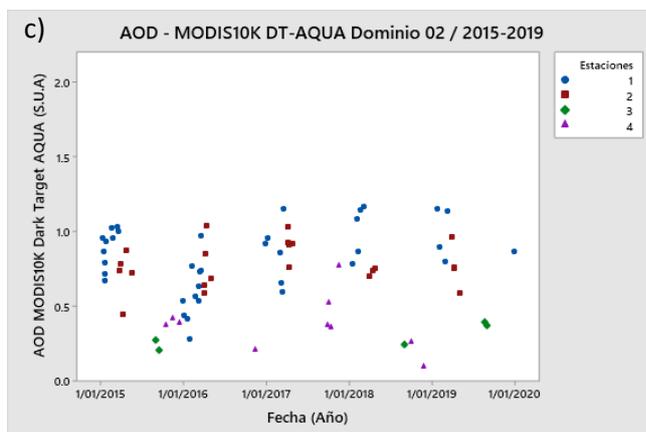
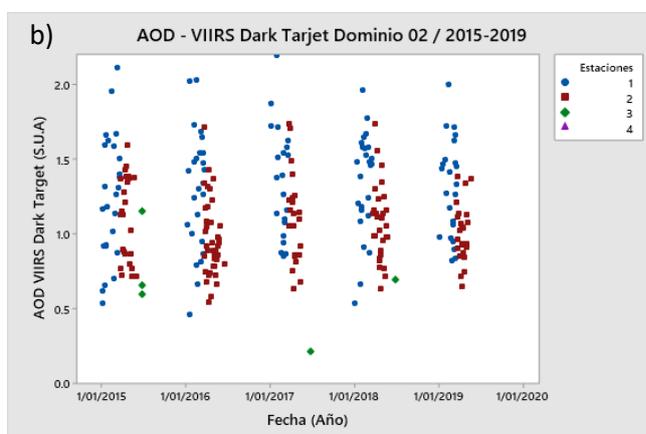
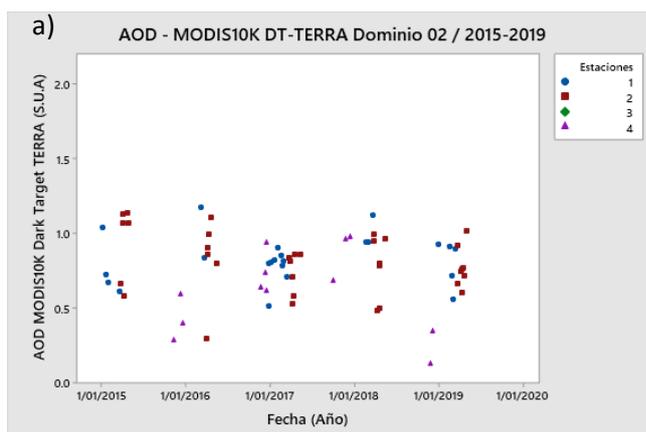


Figura N°34: Promedio diario de AOD representados para el algoritmo Dark Target – Dominio 02 en Lima Metropolitana, obtenidos de MODIS y VIIRS: a) AOD AQUA Dark Target Dominio 02, b) AOD TERRA Dark Target Dominio 02 y c) AOD VIIRS Dark Target Dominio 02.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

En la figura 35-a, se observa información satelital de AOD del satélite AQUA para el algoritmo Deep Blue en el Dominio 03, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es aproximadamente 0.0 SUA; mientras que el máximo valor próximo es de 0.8 para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información continua para todas las estaciones del año.

En la figura 35-b, se observa información satelital de AOD del satélite TERRA para el algoritmo Deep Blue en el Dominio 03, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es aproximadamente 0.0 SUA; mientras que el máximo valor próximo es de 0.8 para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que la información de los productos satelitales es menor a la reportada por el satélite AQUA.

En la figura 35-c, se observa información satelital de AOD del satélite SUOMI NPP para el algoritmo Deep Blue en el Dominio 03, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es mayor que 0.0 S.U.A., mientras que el máximo valor próximo a 1.4 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que presenta más información a diferencia de los otros dos satélites previos. También, se puede observar que presenta un rango más amplio en lo que es el AOD a comparación de los dos satélites anteriores. En los tres satélites evaluados, la información es continua y los rangos son diferentes.

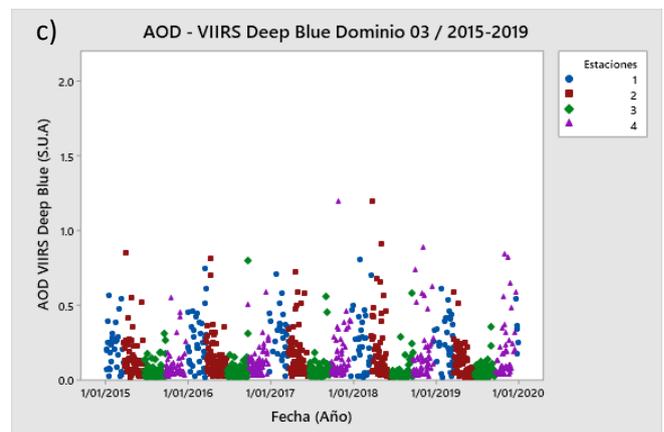
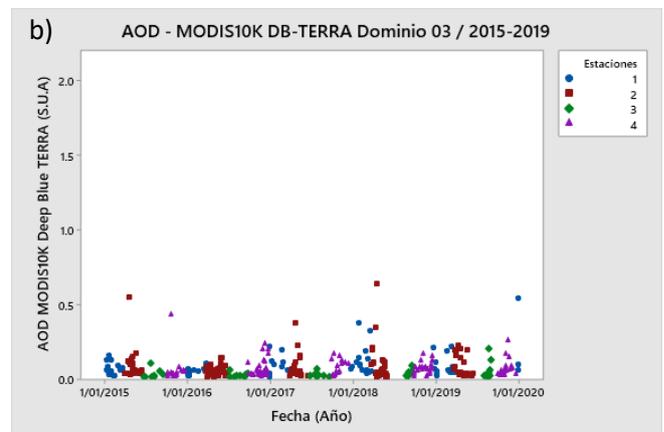
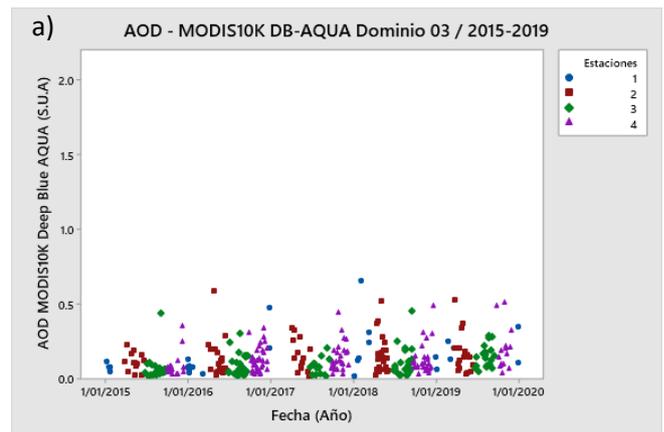
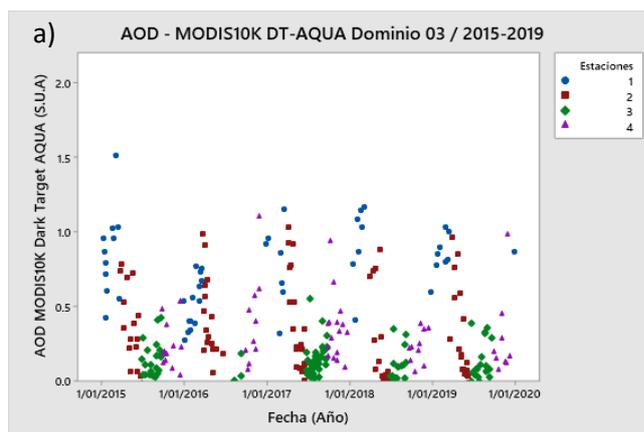


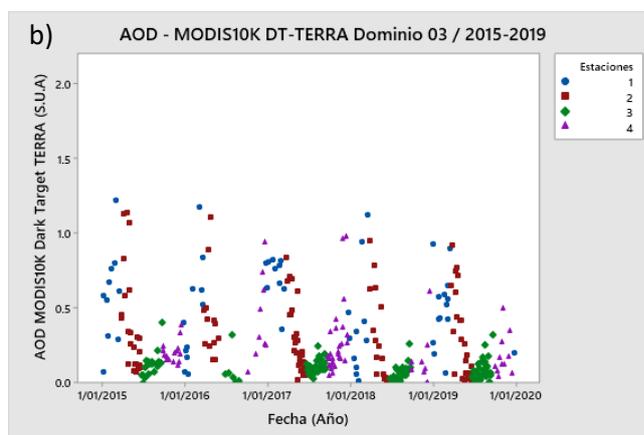
Figura N°35: Promedio diario de AOD representados para el algoritmo Deep Blue – Dominio 03 en Lima Metropolitana, obtenidos de MODIS y VIIRS: a) AOD AQUA Deep Blue Dominio 03, b) AOD TERRA Deep Blue Dominio 03 y c) AOD VIIRS Deep Blue Dominio 03.

Fuente: *(Elaboración propia, 2021)*

En la figura 36-a, se observa información satelital de AOD del satélite AQUA para el algoritmo Dark Target en el Dominio 03, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es aproximadamente 0.0 SUA; mientras que el máximo valor próximo es de 1.6 para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información para todas las estaciones del año, siendo la información de invierno, la que mejor AOD presenta.



En la figura 36-b, se observa información satelital de AOD del satélite TERRA para el algoritmo Dark Target en el Dominio 03, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es aproximadamente 0.0 SUA; mientras que el máximo valor próximo es de 1.4 para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información para todas las estaciones del año, siendo los mayores valores de AOD obtenidos para las estaciones de verano y otoño, mientras que los menores valores obtenidos son para la estación de invierno.



En la figura 36-c, se observa información satelital de AOD del satélite SUOMI NPP para el algoritmo Dark Target en el Dominio 03, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es aproximadamente 0.0 SUA; mientras que el máximo valor próximo es de 2.3 para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información para todas las estaciones del año, siendo las que más prevalecen, las pertenecientes a la estación verano y otoño. Se puede observar que los datos del satélite SUOMI NPP presentan un rango más amplio en lo que es el AOD a comparación de los dos satélites anteriores.

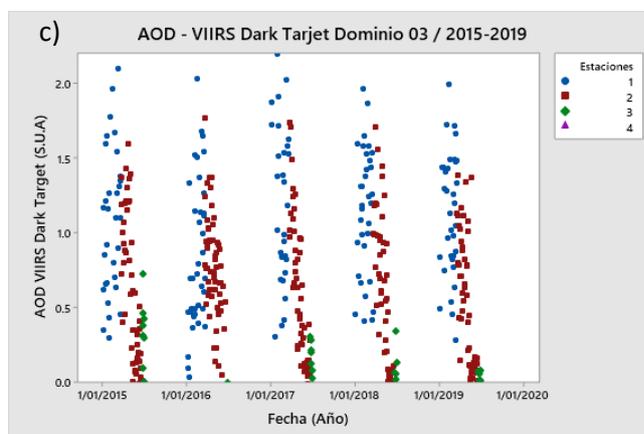


Figura N°36: Promedio diario de AOD representados para el algoritmo Dark Target – Dominio 03 en Lima Metropolitana, obtenidos de MODIS y VIIRS: a) AOD AQUA Dark Target Dominio 03, b) AOD TERRA Dark Target Dominio 03 y c) AOD VIIRS Dark Target Dominio 03.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

Para realizar la representación espacial de la información satelital tal como: AOD-AQUA Dark Target, AOD-AQUA Deep, AOD-TERRA Dark Target, AOD-TERRA Deep Blue, AOD-VIIRS Deep Blue y AOD-VIIRS Dark Target; a todas las distribuciones antes mencionadas se le aplicó un Buffer (Dominio) de 1kmx1km, 3kmx3km y 10kmx10km teniendo en cuenta las diez estaciones de calidad del aire que presenta el área de estudio.

Así mismo, se realizaron mapas con dominios de 25kmx25km (2 dominios), los cuales abarcaron estaciones de calidad de aire y un dominio de 50kmx50km, el cual abarcó a todas las estaciones. Los dominios de antes mencionados son una representación a escala regional de la zona de estudio.

Se puede observar que para la Figura N°37, dominio 25kmx25km, la representación espacial que menos ocurrencias muestran son las del satélite AQUA, TERRA y SUOMI NPP (VIIRS) para el algoritmo Dark Target para el área de estudio delimitado en la ciudad de Lima; mientras que los datos de AOD de los satélites AQUA, TERRA y SUOMI NPP (VIIRS) para el algoritmo Deep Blue, brindan una representación de mayor cantidad de ocurrencias, siendo el satélite SUOMI NPP con el instrumento VIIRS, el que mayor cantidad de datos para representarlo espacialmente. Para el caso de las tres imágenes de mapas del algoritmo Deep Blue, se observa que los datos están distribuidos en mayor cantidad al lado Este de la delimitación; mientras que para los mapas del algoritmo Dark Target se observa que los datos están distribuidos en mayor cantidad en el lado Oeste.

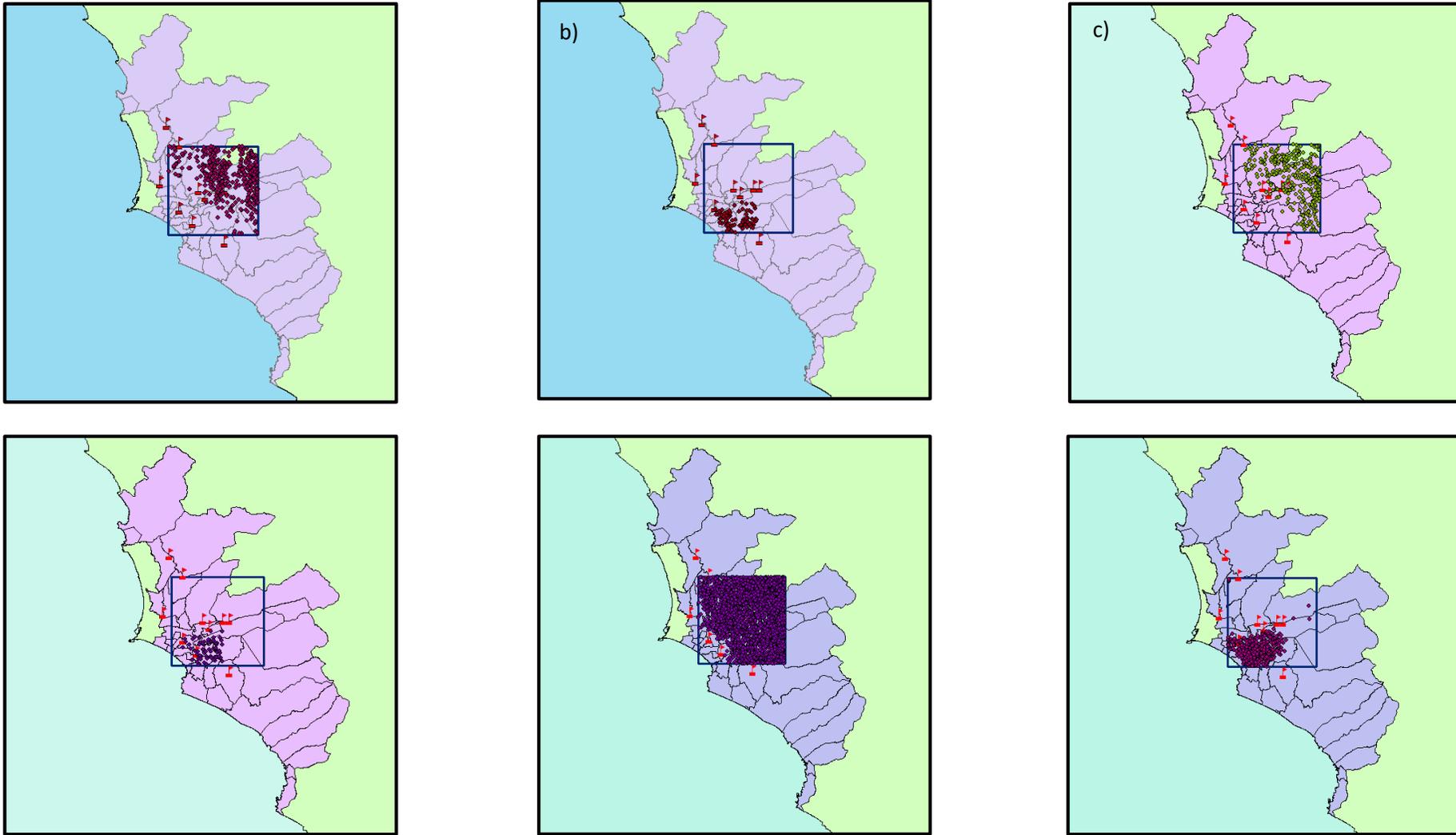


Figura N°37: Representación espacial de AOD representados para el dominio 01 en Lima Metropolitana. a) AOD – AQUA Deep Blue Dominio 01, b) AOD – AQUA Dark Tarjet Dominio 01, c) AOD – TERRA Deep Blue Dominio 01, d) AOD – TERRA Dark Tarjet Dominio 01, e) AOD – SUOMI NPP Deep Blue Dominio 01 y f) AOD – SUOMI NPP Dark Tarjet Dominio 01.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

Para la Figura N°38, dominio 25kmx25km, la representación espacial que menos información muestra, de la misma forma que en la figura anterior, son las del satélite AQUA, TERRA y SUOMI NPP (VIIRS) para el algoritmo Dark Target en el área estudio delimitado en la ciudad de Lima; mientras que los datos de AOD de los satélites AQUA, TERRA y SUOMI NPP (VIIRS) para el algoritmo Deep Blue, brinda una representación de mayor cantidad de datos, siendo el satélite SUOMI NPP con el instrumento VIIRS, el que mayor cantidad de ocurrencias para representarlo espacialmente. Para el caso de las tres imágenes de mapas del algoritmo Deep Blue, se observa que los datos están distribuidos en mayor cantidad al lado Este de la delimitación; mientras que para los mapas del algoritmo Dark Target se observa que los datos se encuentran distribuidos en mayor cantidad en el lado Oeste.

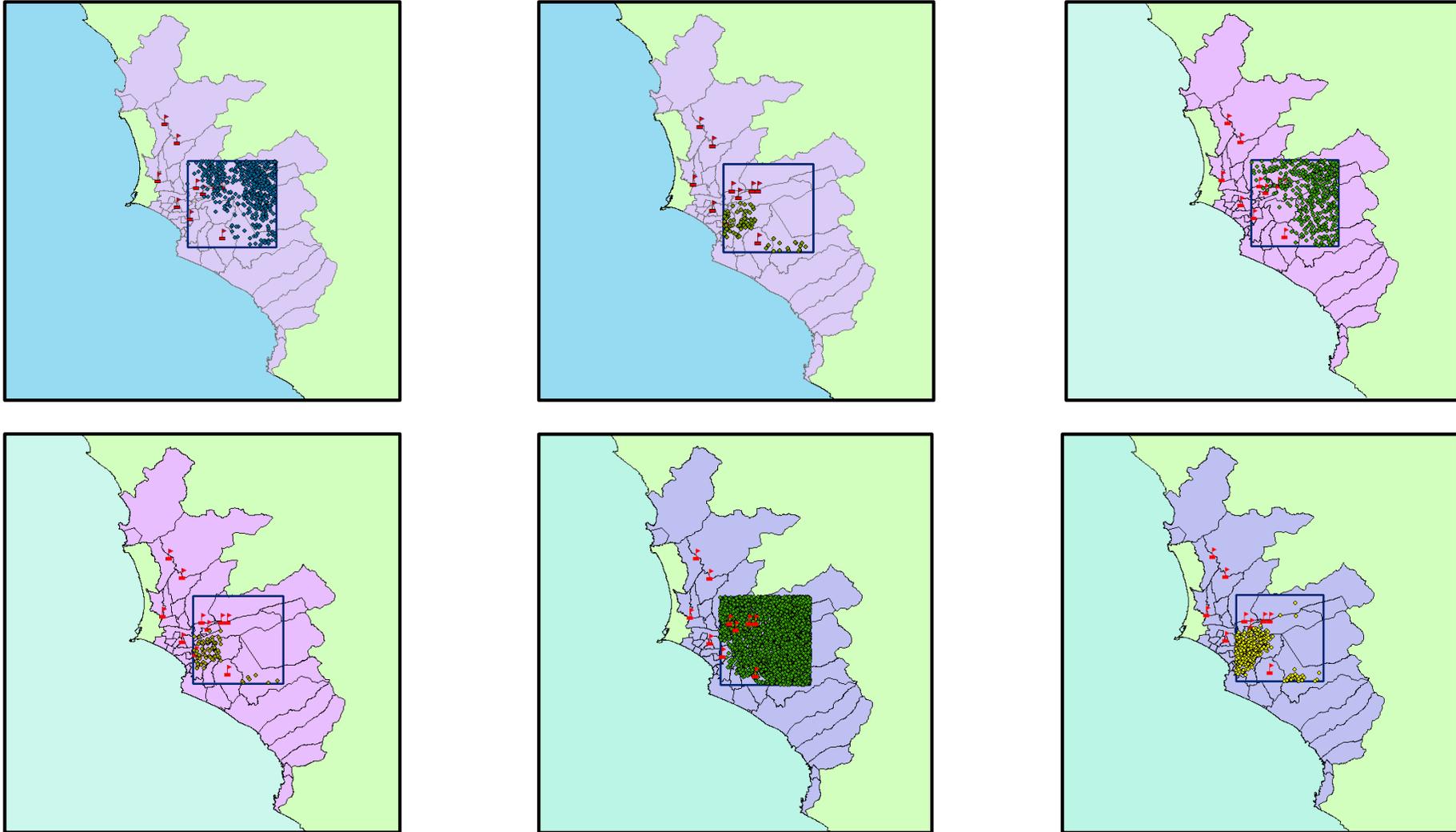


Figura N°38: Representación espacial de AOD representados para el dominio 02 en Lima Metropolitana. a) AOD – AQUA Deep Blue Dominio 02, b) AOD – AQUA Dark Tarjet Dominio 02, c) AOD – TERRA Deep Blue Dominio 02, d) AOD – TERRA Dark Tarjet Dominio 02, e) AOD – SUOMI NPP Deep Blue Dominio 02 y f) AOD – SUOMI NPP Dark Tarjet Dominio 02.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

Finalmente, la Figura N°39, la cual representa espacialmente al Dominio 50kmx50km los datos que menos ocurrencias muestra son las del satélite AQUA, TERRA y SUOMI NPP (VIIRS) para el algoritmo Dark Target en el área estudio delimitado; mientras que los datos de AOD de los satélites AQUA, TERRA y SUOMI NPP (VIIRS) para el algoritmo Deep Blue, dan una representación de mayor cantidad de datos, siendo el satélite SUOMI NPP con el instrumento VIIRS, el que mayor cantidad de ocurrencias para representarlo espacialmente. Para el caso de las tres imágenes de mapas del algoritmo Deep Blue, se observa que los datos están distribuidos en mayor cantidad al lado Este de la delimitación; mientras que para los mapas del algoritmo Dark Target se observa que los datos se encuentran distribuidos por el Noreste, centro y Suroeste.

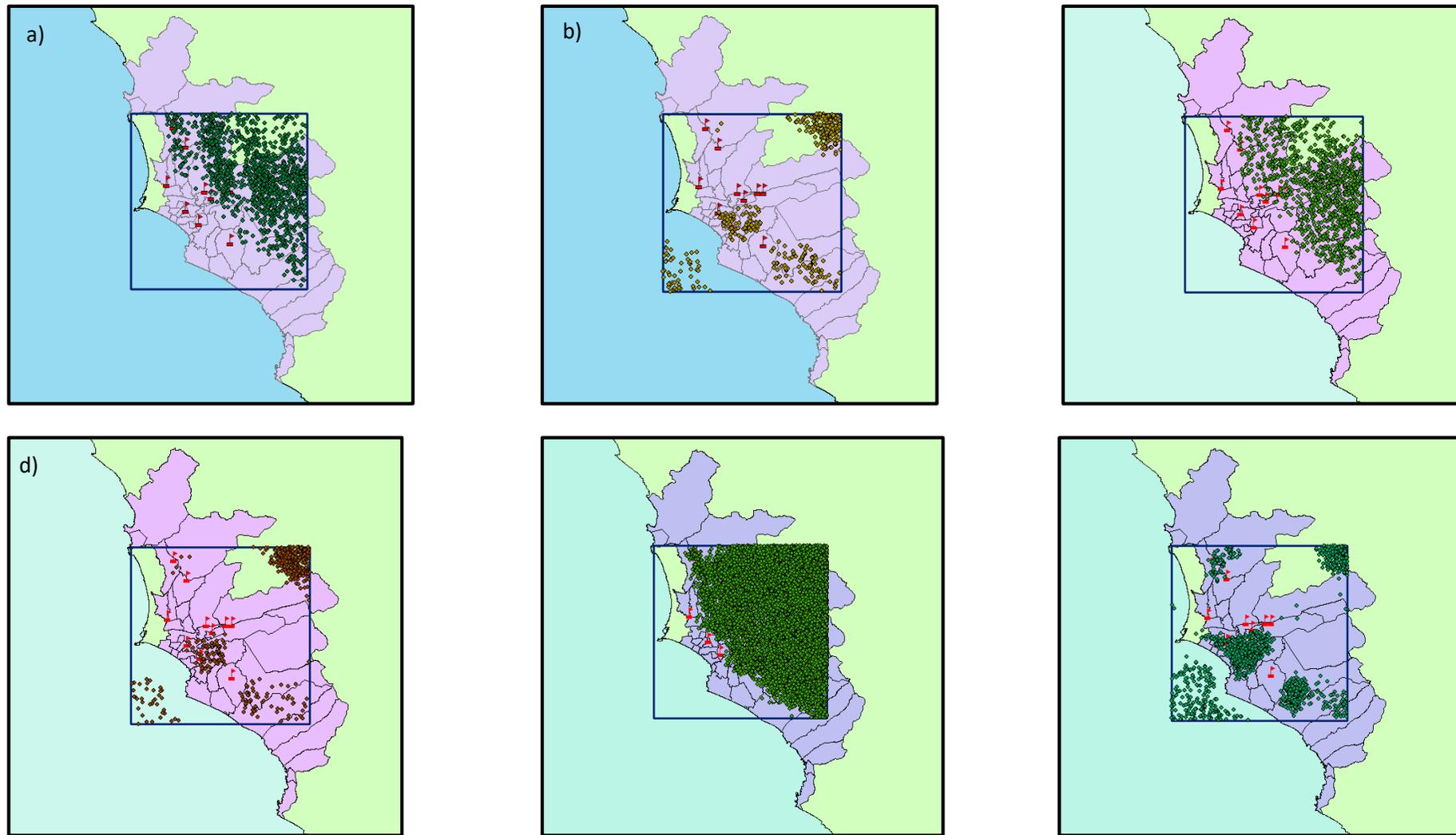


Figura N°39: Representación espacial de AOD representados para el dominio "50kmx50km" en Lima Metropolitana. a) AOD – AQUA Deep Blue Dominio 02, b) AOD – AQUA Dark Tarjet Dominio 02, c) AOD – TERRA Deep Blue Dominio 02, d) AOD – TERRA Dark Tarjet Dominio 02, e) AOD – SUOMI NPP Deep Blue Dominio 02 y f) AOD – SUOMI NPP Dark Tarjet Dominio 02.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

#### 4.2 Síntesis de la información de datos satelitales y datos observados de calidad de aire y meteorología

Una vez obtenida la distribución de datos de AOD en todas las estaciones del SENAMHI y teniendo en cuenta los buffers de 1kmx1km, 3kmx3km, 10kmx10km (aplicados alrededor de cada estación), 25kmx25km y 50kmx50km (aplicados para abarcar un conjunto de estaciones), se procede a trasladar la data hacia un archivo Excel donde se separa por estación, por tipo de instrumento para determinar el promedio diario, número de datos por día y desviación estándar, con la finalidad de que se pueda hallar el porcentaje de disponibilidad de datos de AOD vs los datos en tierra y así determinar los dominios donde se obtienen mayor disponibilidad de información de productos satelitales y datos observados de calidad de aire.

Las tablas N°07, N°08 y N°09 muestran los datos observados de meteorología, calidad de aire y datos de los productos satelitales AQUA - Dark Target y TERRA - Dark Target como promedio diario para el periodo 2015 – 2019. Teniendo en cuenta que cada tabla representa un dominio diferente (Dominio N°01, Dominio N°02 y Dominio N°03, donde se agrupan los datos delimitado para cada dominio ofreciendo los valores de AOD de los satélites y algoritmos mencionados.

Se observa que para la muestra de 01/01/2015 al 20/01/2015, los satélites ofrecen un máximo de seis datos en AQUA – Dark Target, mientras que para los valores de TERRA – Dark Target, solo se registran tres datos; así mismo al lado de cada columna se brinda la información del número de datos por día para el AOD y la desviación estándar en los casos que el número de datos sea mayor que uno.

**Tabla N°07.** Integración de datos de AOD y datos observados para el **Dominio N°1 (25kmx25km)**

ESTACIONES ATE, SBJ, CDM, STA, HCH, SJL												
DATOS OBSERVADOS DE CALIDAD DE AIRE Y METEOROLOGÍA							DATOS DE PRODUCTOS SATELITALES					
FECHA	PM10	PM2.5	TEMP.	HR	PRECIP.	VEL. VIENTO	AQ_DT_AOD	# DATOS	DESVI	TERRA_DT_AOD	# DATOS	DESVI
1/01/2015	66.50	34.39	20.73	83.09	0.00	1.08						
2/01/2015	48.90	16.91	21.26	78.83	0.00	1.33						
3/01/2015	67.55	17.31	21.06	80.61	0.00	1.57						
4/01/2015	59.69	22.14	20.87	81.57	0.00	1.74						
5/01/2015	68.35	23.49	21.40	80.04	0.00	1.60				1.041	1	0
6/01/2015	82.08	25.91	21.08	81.96	0.00	1.79	0.958	1	0			
7/01/2015	79.62	25.36	20.97	80.48	0.00	1.48						
8/01/2015	79.17	24.19	21.16	81.04	0.00	1.32						
9/01/2015	77.89	22.27	21.31	82.48	0.00	1.36						
10/01/2015	73.04	19.93	21.69	80.43	0.00	1.63	0.87	1	0			
11/01/2015	65.26	19.62	21.59	80.13	0.00	1.69						
12/01/2015	71.22	18.47	21.40	80.61	0.00	1.59						
13/01/2015	75.36	20.39	21.07	80.96	0.00	1.41						
14/01/2015	88.43	20.01	21.43	79.96	0.00	1.53						
15/01/2015	89.02	19.56	21.56	82.26	0.00	1.48	0.794	1	0			
16/01/2015	68.26	17.38	21.27	79.13	0.00	1.42						
17/01/2015	79.00	22.47	21.16	78.09	0.00	1.49	0.673	1	0			
18/01/2015	63.25	15.73	21.38	73.17	0.00	1.59						
19/01/2015	73.35	17.42	21.73	72.04	0.00	1.80	0.713	1	0	0.727	1	0
20/01/2015	65.01	17.77	21.37	79.70	0.00	1.50						
21/01/2015	59.87	17.72	21.38	80.04	0.00	1.49						
22/01/2015	75.59	20.31	21.57	81.26	0.00	1.70	0.938	1	0			

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

**Tabla N°08.** Integración de datos de AOD y datos observados para el **Dominio N°2 (25kmx25km)**

ESTACIONES ATE,SBJ,STA,VMT,HCH,SJL												
DATOS OBSERVADOS DE CALIDAD DE AIRE Y METEOROLOGÍA							DATOS DE PRODUCTOS SATELITALES					
FECHA	PM10	PM2.5	TEMP.	HR	PRECIP.	VEL. VIEN	AQ_DT_AOD	# DATOS	DESVI	ERRA_DT_AO	# DATOS	DESVI
1/01/2015	85.12	35.02										
2/01/2015	69.48	17.18										
3/01/2015	90.26	17.54										
4/01/2015	81.16	21.82										
5/01/2015	88.76	23.54								1.041	1	0
6/01/2015	100.02	26.41					0.958	1	0			
7/01/2015	94.86	25.12										
8/01/2015	95.43	23.78										
9/01/2015	92.41	22.34										
10/01/2015	82.75	19.93					0.87	1	0			
11/01/2015	73.54	19.62										
12/01/2015	80.42	18.47										
13/01/2015	85.21	18.36										
14/01/2015	101.86	21.30										
15/01/2015	110.42	21.75					0.794	1	0			
16/01/2015	76.99	18.17										
17/01/2015	91.99	24.08					0.673	1	0			
18/01/2015	76.87	16.63										
19/01/2015	91.95	18.06					0.713	1	0	0.727	1	0
20/01/2015	87.09	18.56										

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

**Tabla N°09.** Integración de datos de AOD y datos observados para el **Dominio N°03 (50kmx50km)**

TODAS LAS ESTACIONES (50kmx50km)												
DATOS OBSERVADOS DE CALIDAD DE AIRE Y METEOROLOGÍA							DATOS DE PRODUCTOS SATELITALES					
FECHA	PM10	PM2.5	TEMP.	HR	PRECIP.	VEL. VIEN	AQ_DT_AOD	# DATOS	DESVI	ERRA_DT_AO	# DATOS	DESVI
1/01/2015	72.87	37.55	20.73	83.09	0.00	1.08						
2/01/2015	57.71	17.73	21.26	78.83	0.00	1.33						
3/01/2015	70.53	17.77	21.06	80.61	0.00	1.57				0.0685	2	0.00212132
4/01/2015	66.23	21.21	20.87	81.57	0.00	1.74						
5/01/2015	85.58	23.43	21.40	80.04	0.00	1.60				0.5785	2	0.65407377
6/01/2015	88.91	26.29	21.08	81.96	0.00	1.79	0.958	1				
7/01/2015	88.67	25.28	20.97	80.48	0.00	1.48						
8/01/2015	86.79	23.89	21.16	81.04	0.00	1.32						
9/01/2015	84.76	22.86	21.31	82.48	0.00	1.36						
10/01/2015	78.33	21.30	21.69	80.43	0.00	1.63	0.87	1				
11/01/2015	69.26	21.63	21.59	80.13	0.00	1.69						
12/01/2015	73.38	18.64	21.40	80.61	0.00	1.59						
13/01/2015	79.13	20.04	21.07	80.96	0.00	1.41						
14/01/2015	94.60	21.50	21.43	79.96	0.00	1.53						
15/01/2015	101.41	22.35	21.56	82.26	0.00	1.48	0.794	1				
16/01/2015	70.54	17.81	21.27	79.13	0.00	1.42						
17/01/2015	83.64	22.81	21.16	78.09	0.00	1.49	0.424	4	0.32283123			
18/01/2015	67.88	16.54	21.38	73.17	0.00	1.59						
19/01/2015	82.97	17.50	21.73	72.04	0.00	1.80	0.713	1		0.54733333	3	0.22282355
20/01/2015	75.61	17.81	21.37	79.70	0.00	1.50						

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

Una vez determinado el promedio diario, número de datos y desviación estándar de los parámetros mencionados previamente para AQUA Deep Blue 10k, AQUA Dark Target 10k, TERRA Deep Blue 10k y TERRA Dark Target 10k, se halla el porcentaje de disponibilidad de datos para cada dominio generado.

En la Tabla N°10 se muestra un resumen del porcentaje de disponibilidad que presenta cada estación de calidad de aire respecto a la data meteorológica y respecto al AOD establecido para un dominio de 10kmx10km, dando como resultado un porcentaje de disponibilidad de AOD demasiado bajo con un valor menor a 5.0%, por lo que, el bajo porcentaje de disponibilidad de datos en cada estación no hace factible el estudio de manera local, es por eso que, para aumentar la disponibilidad de datos se procede a agrupar las estaciones para trabajarlo de manera regional, de tal manera que aumente la disponibilidad de datos y se pueda determinar las tendencias de los datos de productos satelitales y los de datos observados de calidad de aire.

**Tabla N°10.** Resumen de porcentaje de disponibilidad de datos para los parámetros de AOD - 1kmx1km, 3kmx3km y 10kmx10km VS Datos en tierra para el periodo 2015 – 2019

	PORCENTAJE DE DISPONIBILIDAD DE DATOS	
	METEOROLOGÍA	AOD Dominio 10kmx10km
ATE	> 46.2%	< 5.0%
SAN BORJA	> 30.7%	< 0.1%
CAMPOMARTE	> 83.7%	< 0.1%
SANTA ANITA	> 27.3%	< 3.0%
VMT	> 25.6%	< 0.4%
HUACHIPA	> 35.2%	< 5.0%
SJL	> 41.9%	< 2.3%
SMP	> 54.6%	< 0.3%
CARABAYLLO	> 48.0%	< 3.0%
PUENTE PIEDRA	> 51.3%	< 2.2%

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Cabe resaltar que también se elaboró el porcentaje de disponibilidad de datos para los buffers de 1kmx1km y 3kmx3km para cada estación, sin embargo, el valor del porcentaje resultó mucho menor a los hallado para el buffer de 10kmx10km, por lo que tampoco no es factible analizar esos dominios por el escaso porcentaje que presenta AOD en los buffers antes mencionados.

Luego de analizada la tabla de porcentaje de disponibilidad de datos y haber determinado la agrupación de estaciones para trabajar a una escala regional, se procedió agrupar estaciones a las cuales se las llamó Dominio N°01 y N°02, los cuales representan un buffer de 25kmx25km; y el Dominio N°03 (50kmx50km), éste último abarca todas las estaciones de calidad de aire.

En la Tabla N°11 se presenta el porcentaje de disponibilidad de datos de productos satelitales para los valores de AOD AQUA – Dark Target y TERRA – Dark Target respecto a los dominios N°01, N°02 y el dominio N° 03, brindando como resultado un valor aproximado de 4% para los dominios N°01 y N°02 en ambos satélites; mientras que para el dominio de 50kmx50km el porcentaje aumenta a un 18% en promedio para ambos satélites. Se tuvo en cuenta que los datos que proporciona el algoritmo Dark Target son menores comparado con los que puede otorgar el algoritmo Deep Blue.

**Tabla N°11.** Porcentaje de disponibilidad de datos para los parámetros de AQUA y TERRA Dark Target 10K - 25kmx25km y 50kmx50km VS Datos en tierra para el periodo 2015 – 2019

Estaciones	Meteorología					AQUA Dark Target	TERRA Dark Target
	PM10	PM2.5	TEMP	HR	VEL VIENTO	AQUA DT AOD	TERRA DT AOD
Dominio 1 (25x25km)	98.7%	98.7%	97.9%	98.2%	97.7%	4.1%	3.8%
Dominio 2 (25x25km)	95.1%	97.3%	71.9%	73.6%	63.4%	4.1%	3.8%
Dominio 3 (50kmx50km)	95.1%	97.4%	71.9%	71.9%	63.5%	16.7%	19.4%

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

La Tabla N°12 se muestran los porcentajes de disponibilidad de datos de productos satelitales para los valores de AOD AQUA – Deep Blue y TERRA – Deep Blue respecto a los dominios N°01, N°02 y el dominio N° 03, dando como resultado promedio de 10% para el primer dominio en ambos satélites, y un porcentaje promedio de 13.5% para el segundo dominio en ambos satélites, sin embargo, en el caso del dominio más grande se tuvo un porcentaje promedio de 18.5%.

**Tabla N°12.** Porcentaje de disponibilidad de datos para los parámetros de AQUA y TERRA Deep Blue 10K - 25kmx25km y 50kmx50km VS Datos en tierra para el periodo 2015 – 2019

Estaciones	Meteorología					AQUA Deep Blue	TERRA Deep Blue
	PM10	PM2.5	TEMP	HR	VELOC VIENTO	AQUA_DB_AOD	TERRA_DB_AOD
Dominio 1 (25x25km)	98.7%	98.7%	97.9%	98.2%	97.7%	11.2%	9.6%
Dominio 2 (25x25km)	95.1%	97.3%	71.9%	73.6%	63.4%	13.8%	12.9%
Dominio 50kmx50km	95.1%	97.4%	71.9%	71.9%	63.5%	18.3%	18.8%

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Finalmente, en la Tabla N°13 se muestra los porcentajes de disponibilidad de datos de productos satelitales para los valores de AOD VIIRS – Deep Blue y VIIRS – Dark Target respecto a los dominios N°01, N°02 y el dominio N° 03, donde los resultados para el caso de Deep Blue tuvieron un valor de 36%, 42% y 67% para los dominios N°01, N°02 y dominio más grande, respectivamente; mientras que para el caso del algoritmo Dark Target, los valores fueron menores a los registrados por el otro algoritmo brindando un valor de 15%, 15% y 26% para el primer, segundo y más grande dominio respectivamente.

**Tabla N°13.** Porcentaje de disponibilidad de datos para los parámetros de VIIRS Deep Blue y Dark Target - 25kmx25km y 50kmx50km VS Datos en tierra para el periodo 2015 – 2019

Estaciones	Meteorología					VIIRS Deep Blue	VIIRS Dark Target
	PM10	PM2.5	TEMP.	HR	VEL. VIENTO	VIIRS DB AOD	VIIRS DT AOD
Dominio 1 (25x25km)	99%	99%	98%	98%	98%	36%	15%
Dominio 2 (25x25km)	95%	97%	72%	74%	63%	42%	15%
Dominio 50kmx50km	95%	97%	72%	72%	64%	67%	26%

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Una vez obtenido los porcentajes de disponibilidad de datos para el periodo de 2015 – 2019 de los tres dominios antes mencionados, y teniendo en cuenta que son éstos tres dominios los que ofrecieron resultados altos a comparación de los demás, se escogen estos dominios como los “Best Dominios”, los cuales están integrados por datos observados de calidad de aire y datos de productos satelitales, y se procedió a realizar el análisis estadístico para determinar la tendencia que presenta cada uno de los dominios.

### 4.3 Análisis estadístico de datos integrados de productos satelitales y observados de calidad de aire y meteorología

El primer paso para trabajar los dominios establecidos es aplicar el método de Valores Extremos, donde se aplicó al dominio de 50kmx50km, dado que el dominio mencionado abarca a los dos dominios de 25kmx25km y también debido a que abarca a toda la ciudad de Lima.

En la figura 40-a, se presenta los valores extremos para  $PM_{10}$  donde el rango de los valores máximos es entre  $40 \mu g/m^3$  y  $160 \mu g/m^3$ ; mientras que para los valores mínimos el rango se encuentra entre  $10 \mu g/m^3$  y  $80 \mu g/m^3$ . En la figura 40-b se muestran los valores extremos para  $PM_{2.5}$ , donde los máximos de enero del 2017, 2018 y 2019 se encuentran muy por encima del promedio para el Dominio N°03. El rango de los valores máximo para la figura de  $PM_{2.5}$  es entre  $20 \mu g/m^3$  y  $100 \mu g/m^3$ ; mientras que para los valores mínimos el rango se encuentra entre  $10 \mu g/m^3$  y  $30 \mu g/m^3$ .

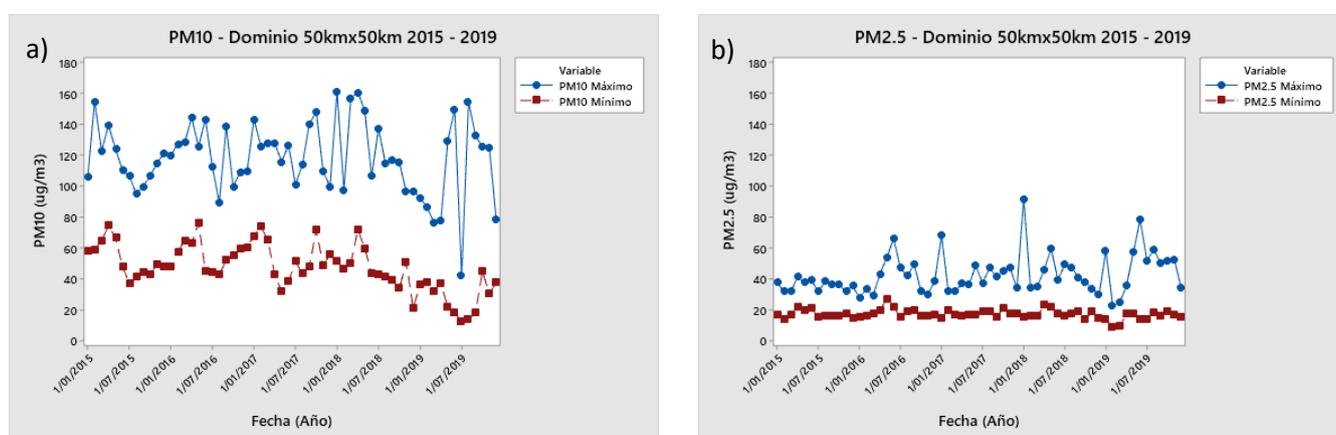


Figura N°40: Valores Extremos de parámetros de calidad de aire del Dominio N°03 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a)  $PM_{10}$  y b)  $PM_{2.5}$

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

En la figura 41-a, se presenta los valores extremos para Temperatura donde el rango de los valores máximos se encuentra entre  $16^{\circ}C$  y  $28^{\circ}C$ , alcanzando su máximo en el año 2019; mientras que el rango de los valores mínimos se encuentra entre  $13^{\circ}C$  y  $24^{\circ}C$ , alcanzando su mínimo valor a finales del 2019. En la figura 41-b se muestran los valores extremos para Humedad Relativa, donde el rango de los valores máximos se encuentra entre 75% y 95% para el Dominio N°03; mientras que el rango de los valores mínimos se encuentra entre 50% y 90%.

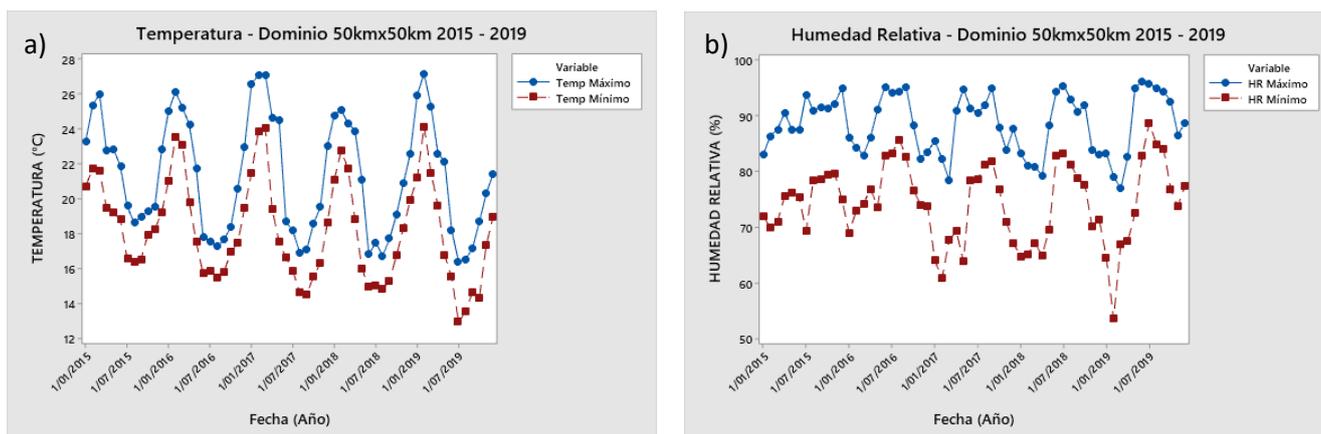


Figura N°41: Valores Extremos de parámetros de temperatura y humedad relativa del Dominio N°03 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) Temperatura y b) Humedad Relativa.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

En la figura 42-a, se presenta los valores extremos para precipitación, siendo la menor precipitación registrada quasi-nula, y el rango de los máximos valores se encuentra entre 0.0 mm y 0.20 mm, siendo el máximo valor obtenido en julio del 2019. En la figura 42-b se muestran los valores extremos para Velocidad de Viento, donde el rango de los máximos valores se encuentra entre 1.5 m/s y 4.0 m/s, siendo los máximos valores generado a mitad del año 2015; mientras que el rango de los valores mínimos se encuentra entre 0.5 m/s y 2.0 m/s, siendo el mínimo valor generado en junio del 2015 para el Dominio N°03.

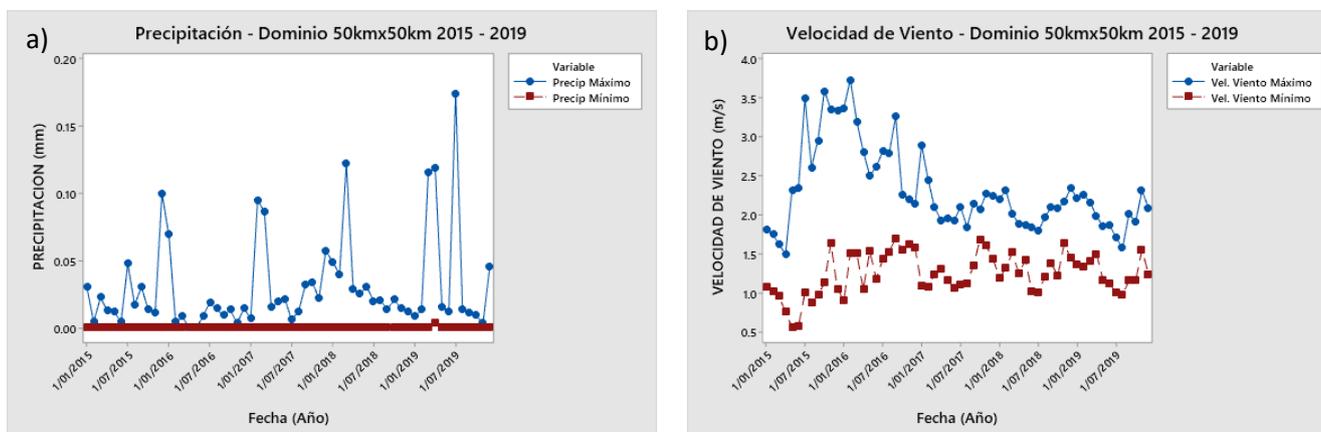
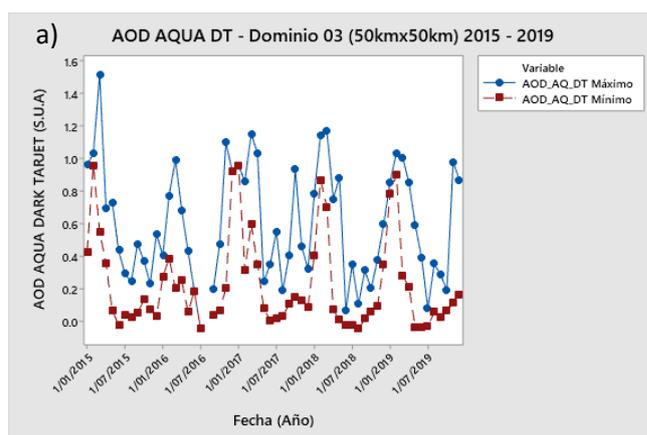


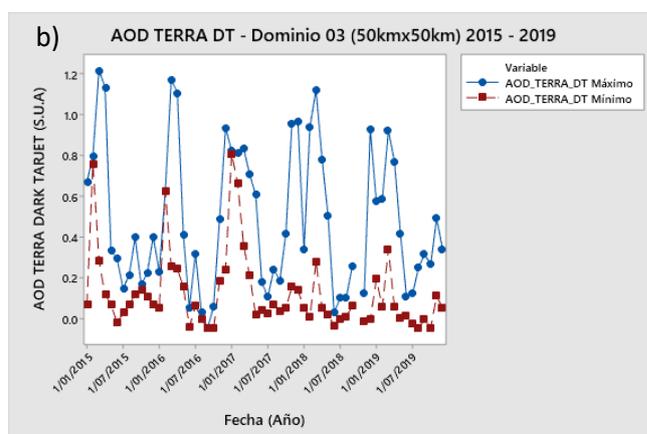
Figura N°42: Valores Extremos de parámetros de Precipitación y Velocidad de Viento en el Dominio N°03 en Lima Metropolitana, obtenidos de SENAMHI: a) Precipitación y b) Velocidad de Viento.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

En la figura 43-a, se observa valores extremos de la información satelital de AOD del satélite AQUA para el algoritmo Dark Target en el Dominio 03, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es mayor que 0.0 SUA; mientras que el máximo valor próximo es de 1.5 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información para todas las estaciones del año.



En la figura 43-b, se observa valores extremos de la información satelital de AOD del satélite TERRA para el algoritmo Dark Target en el Dominio 03, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es mayor que 0.0 SUA; mientras que el máximo valor próximo es de 1.5 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información para todas las estaciones del año. También se puede observar que las figuras 43-a y 43-b son similares, teniendo en cuenta que son diferentes satélites, pero con el mismo algoritmo (Dark Target).



En la figura 43-c, se observa valores extremos de la información satelital de AOD del satélite SUOMI NPP para el algoritmo Dark Target en el Dominio 03, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es mayor que 0.0 SUA; mientras que el máximo valor próximo es de 2.7 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que no existe información completa para el periodo de estudio. Se puede observar que los datos del satélite SUOMI NPP presentan un rango más amplio en lo que es el AOD a comparación de los dos satélites anteriores; así mismo, se observa que las oscilaciones no son definidas para el satélite mencionado. Se puede ver que la figura 43-c presenta aproximadamente el doble de rango a diferencia que las figuras 43-a y 43-b; así mismo, se muestra que los datos de AOD VIIRS DT no son continuos para el periodo evaluado.

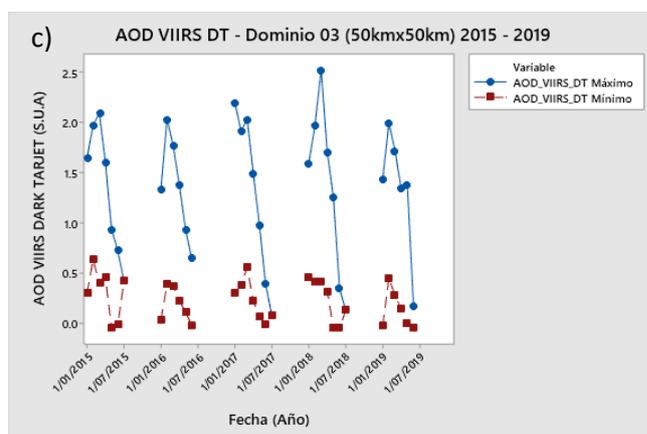
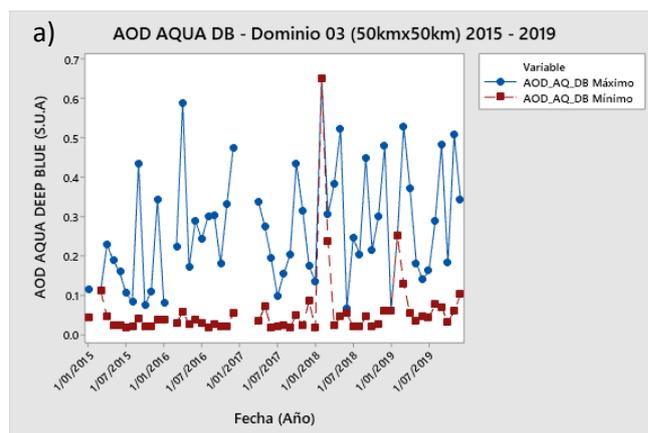


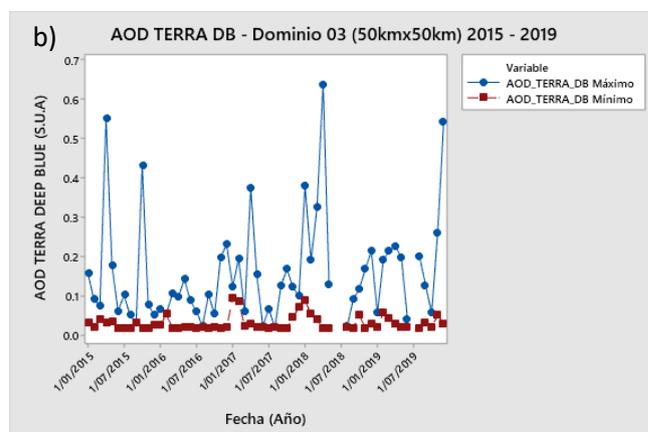
Figura N°43: Valores Extremos de parámetros de AOD Dark Target en el Dominio N°03 en Lima Metropolitana, obtenidos de MODIS y VIIRS: a) AOD AQUA Dark Target Dominio 03, b) AOD TERRA Dark Target Dominio 03 y c) AOD VIIRS Dark Target Dominio 03.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

En la figura 44-a, se observa valores extremos de la información satelital de AOD del satélite AQUA para el algoritmo Deep Blue en el Dominio 03, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es mayor que 0.0 S.U.A., mientras que el máximo valor próximo es de 0.7 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información para todas las estaciones del año.



En la figura 44-b, se observa valores extremos de la información satelital de AOD del satélite TERRA para el algoritmo Deep Blue en el Dominio 03, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es mayor que 0.0 S.U.A., mientras que el máximo valor próximo es de 0.7 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información para todas las estaciones del año.



En la figura 44-c, se observa valores extremos de la información satelital de AOD del satélite SUOMI NPP para el algoritmo Deep Blue en el Dominio 03, donde se aprecia que el mínimo valor de AOD registrado es mayor que 0.0 S.U.A., mientras que el máximo valor próximo es de 1.2 S.U.A. para el periodo evaluado (05 años); así mismo, se observa que existe información completa para el periodo de estudio. Se puede ver que la figura 44-c presenta aproximadamente el doble de rango a diferencia que las figuras 44-a y 44-b; así mismo, se muestra que los datos mínimos de AOD VIIRS DB presentan una menor ocurrencia mayores a 0, a diferencia de AOD TERRA DB y AOD AQUA DB.

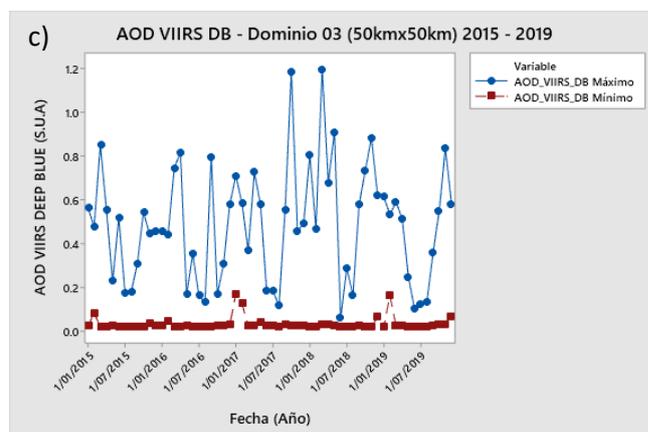


Figura N°44: Valores Extremos de parámetros de AOD Deep Blue en el Dominio N°03 en Lima Metropolitana, obtenidos de MODIS y VIIRS: a) AOD AQUA Deep Blue Dominio 03, b) AOD TERRA Deep Blue Dominio 03 y c) AOD VIIRS Deep Blue Dominio 03.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

En la Tabla N°10 se describe el porcentaje de disponibilidad que presenta cada estación de calidad de aire respecto a la data meteorológica y respecto al AOD para un dominio de 10kmx10km, brindando como resultado un porcentaje de disponibilidad de AOD menor a 5.0% por lo que, no hace factible el estudio de manera local. Por ello, para aumentar la disponibilidad de datos se procede a agrupar estaciones y trabajar de manera regional formando así dominios de 25km x 25km y 50km x 50km; de tal manera que la disponibilidad de datos sea mayor y se pueda determinar las tendencias de los datos de AOD y de los datos de calidad de aire.

Como siguiente punto para la evaluación de datos mediante métodos estadísticos, se procedió a evaluar la Función de Densidad de Probabilidad del conjunto de datos del Dominio 03 (50km x 50km), se establece la distribución de las ocurrencias obtenidas para los parámetros de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , Temperatura, Humedad Relativa, Precipitación y Velocidad de Viento, AOD Dark Target (MODIS-AQUA, MODIS-TERRA y VIIRS-SUOMI NPP) y AOD Deep Blue (MODIS-AQUA, MODIS-TERRA y VIIRS-SUOMI NPP).

En la Figura N°45 para el dominio evaluado, se muestran los gráficos de Funciones de Densidad de Probabilidad e Histograma de los parámetros de calidad de aire y meteorológicos, donde las ocurrencias de  $PM_{10}$  presentan una tendencia Gaussiana, mientras que  $PM_{2.5}$  presenta una tendencia a Distribución tipo Peak; la variable temperatura presenta una ligera tendencia bimodal, mientras que las variable de humedad relativa presenta una tendencia de tipo Peak; la variables precipitación presenta una tendencia exponencial; y finalmente, la variable de velocidad de viento presenta una tendencia de distribución tipo Peak. Los promedios están cerca de las modas, pero en el centro de la bimodal, que tiende a Gaussiana.

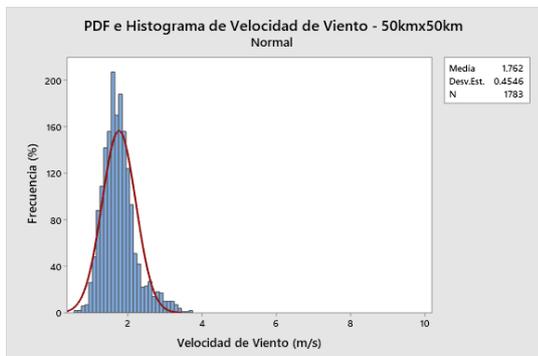
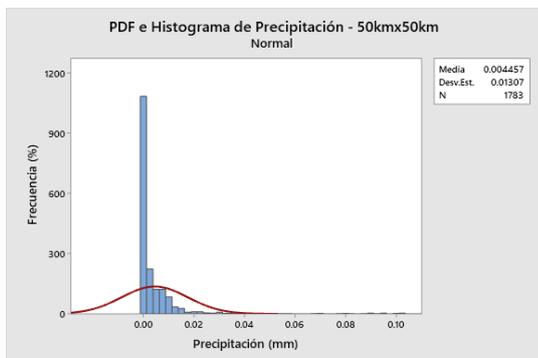
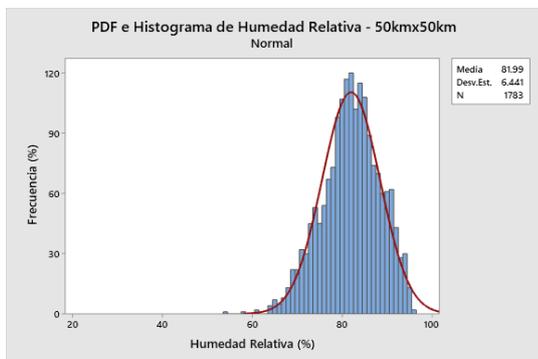
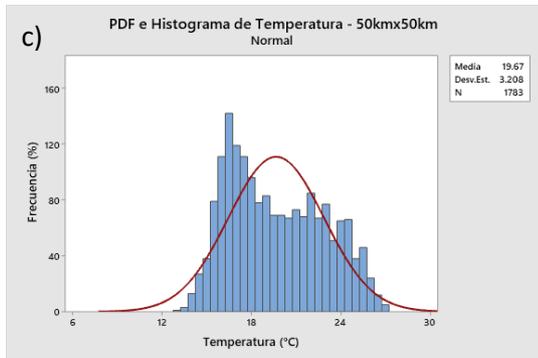
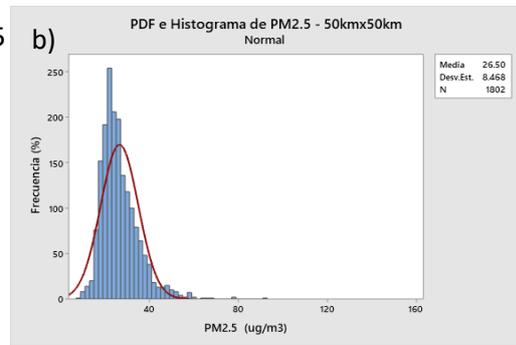
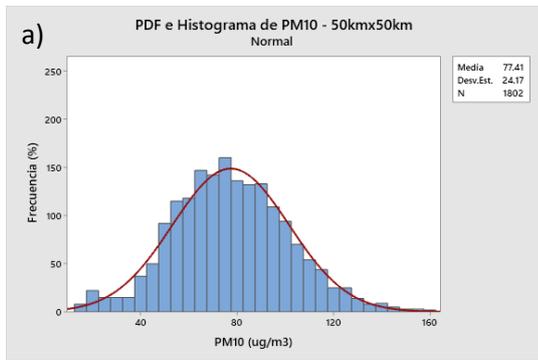


Figura N°45: PDF e Histograma de parámetros de calidad de aire y meteorología del Dominio O3, obtenidos de SENAMHI: a)  $PM_{10}$ , b)  $PM_{2.5}$ , c) Temperatura, d) Humedad Relativa, e) Precipitación y f) Velocidad de Viento. Fuente: (Elaboración propia, 2021)

En la Figura N°46, se muestran los gráficos de Funciones de Densidad de Probabilidad e Histograma de los parámetros de AOD para los satélites AQUA, TERRA y SUOMI NPP en los algoritmos Dark Tarjet y Deep Blue para el Dominio 03 (50km x 50km); donde las figuras 46-a, 46-b y 46-d presentan una tendencia de tipo Skew Right; mientras que las figuras 46-c y 46-e presentan una tendencia de tipo exponencial; finalmente, la figura 46-f presenta una tendencia Gaussiana aunque la moda se encuentra en los valores más bajos.

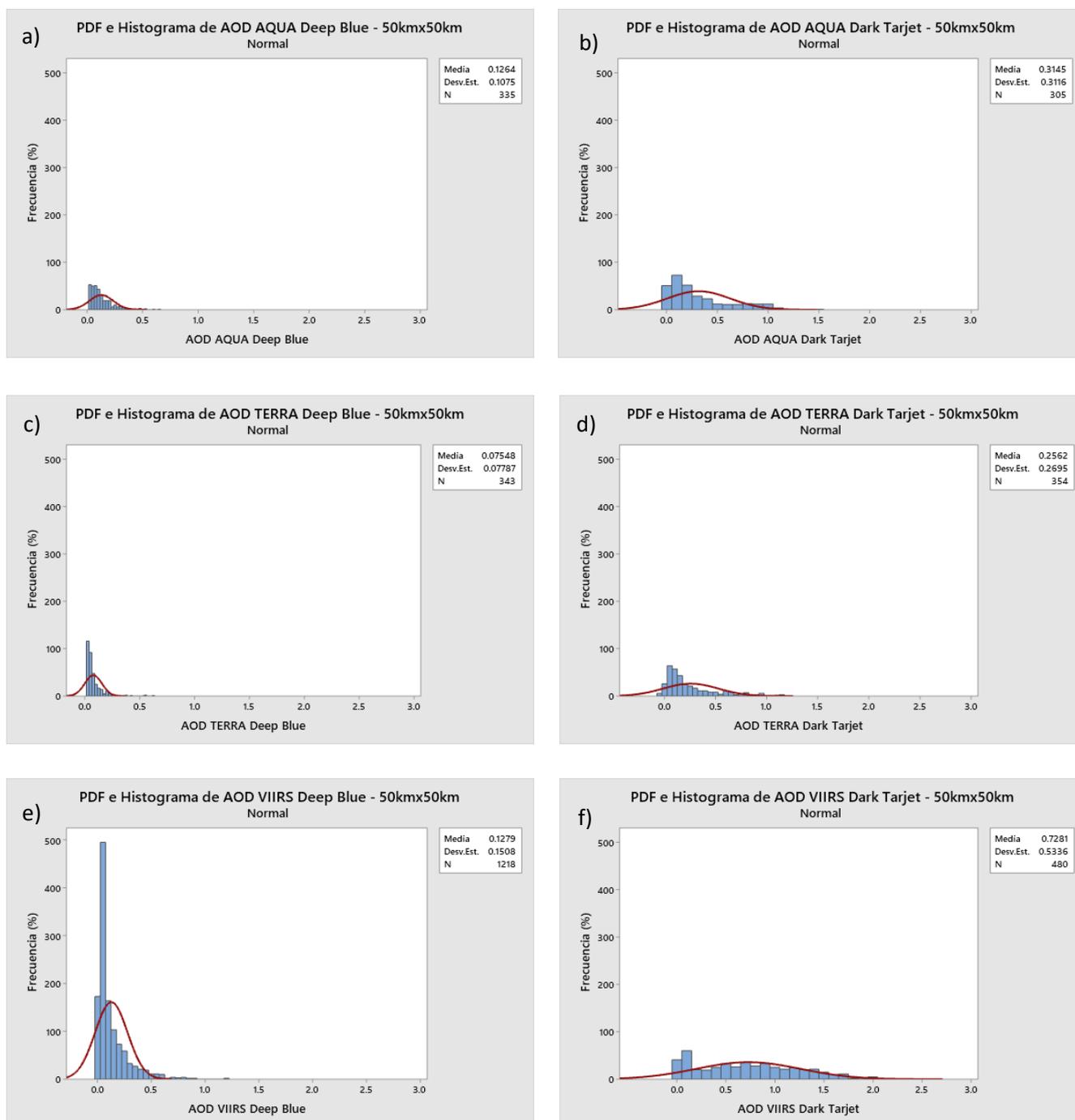


Figura N°46: PDF e Histograma de información satelital del Dominio 03, obtenidos de SENAMHI: a) AOD – AQUA Deep Blue Dominio 03, b) AOD – AQUA Dark Tarjet Dominio 03, c) AOD – TERRA Deep Blue Dominio 03, d) AOD – TERRA Dark Tarjet Dominio 03, e) AOD – SUOMI NPP Deep Blue Dominio 03 y f) AOD – SUOMI NPP Dark Tarjet Dominio 03.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

El siguiente método estadístico es la proyección de información satelital para el Dominio N°03, se proyecta los parámetros de AOD Dark Target (MODIS-AQUA, MODIS-TERRA y VIIRS-SUOMI NPP) y AOD Deep Blue (MODIS-AQUA, MODIS-TERRA y VIIRS-SUOMI NPP) sobre la información meteorológica (Temperatura, Humedad Relativa y Velocidad de Viento) obtenida del SENAMHI.

En la Figura N°47, se muestran los gráficos de Proyecciones de la información satelital de AOD en el algoritmo Dark Target sobre el parámetro meteorológico de Temperatura para el Dominio N°03, el cual abarca todas las estaciones del SENAMHI.. En la Figura 47-a específicamente se presenta la proyección de la información de AOD del satélite AQUA sobre el parámetro de Temperatura, donde presenta un  $R^2$  de 0.5 con una pendiente positiva para la información evaluada; mientras que para la figura 47-b representado para la información de AOD en el satélite TERRA el valor de  $R^2$  es de 0.44 y con una pendiente positiva al igual que la figura 47-a. Finalmente, la figura 47-c evaluado para la información de AOD en el satélite SUOMI NPP presenta un valor de  $R^2$  de 0.44 y con una pendiente del doble de valor comparado con los otros dos satélites evaluados; así mismo, se tiene que a mayor temperatura existe una mayor dispersión.

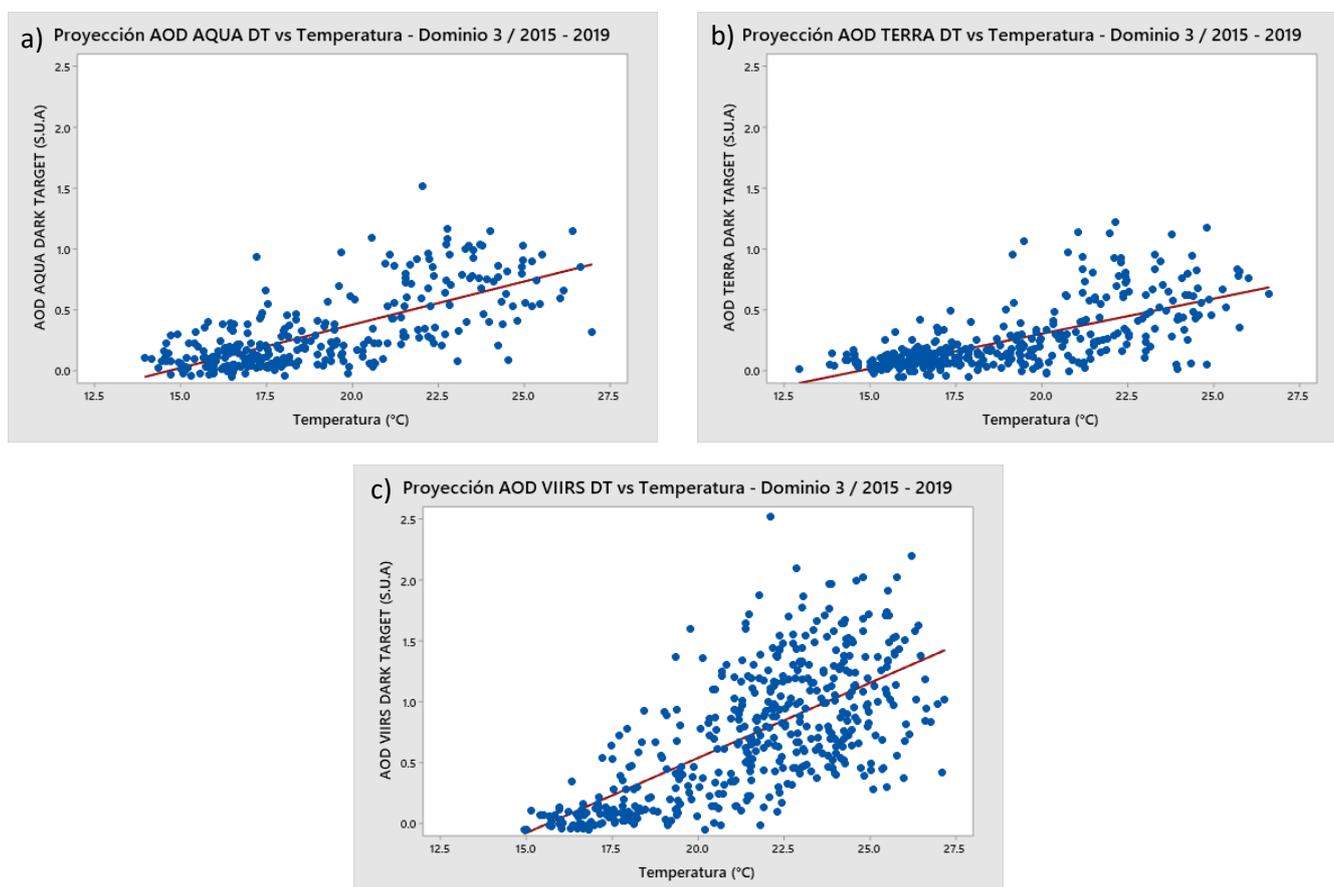


Figura N°47: Proyección de información de AOD del algoritmo Dark Target sobre el parámetro de Temperatura del Dominio 03, obtenido de MODIS, VIIRS y SENAMHI: a) AOD – AQUA Dark Target Dominio 03, b) AOD – TERRA Dark Target Dominio 03 y c) AOD – VIIRS Dark Target Dominio 03.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

En la Figura N°48, se muestran los gráficos de Proyecciones de la información satelital de AOD en el algoritmo Deep Blue sobre el parámetro meteorológico de Temperatura. En la Figura 48-a concretamente se presenta la proyección de la información de AOD del satélite AQUA sobre el parámetro de Temperatura, donde presenta un  $R^2$  de 0.04 con una pendiente positiva para la información evaluada; mientras que para la figura 48-b representado para la información de AOD en el satélite TERRA el valor de  $R^2$  es de 0.04 y con una pendiente positiva al igual que la figura 48-a. Finalmente, la figura 48-c evaluado para la información de AOD en el satélite SUOMI NPP presenta un valor de  $R^2$  de 0.20 y con una pendiente del doble de valor aproximadamente comparado con los otros dos satélites evaluados, se puede verificar que en todas las gráficas presentadas, las pendientes son muy bajas.

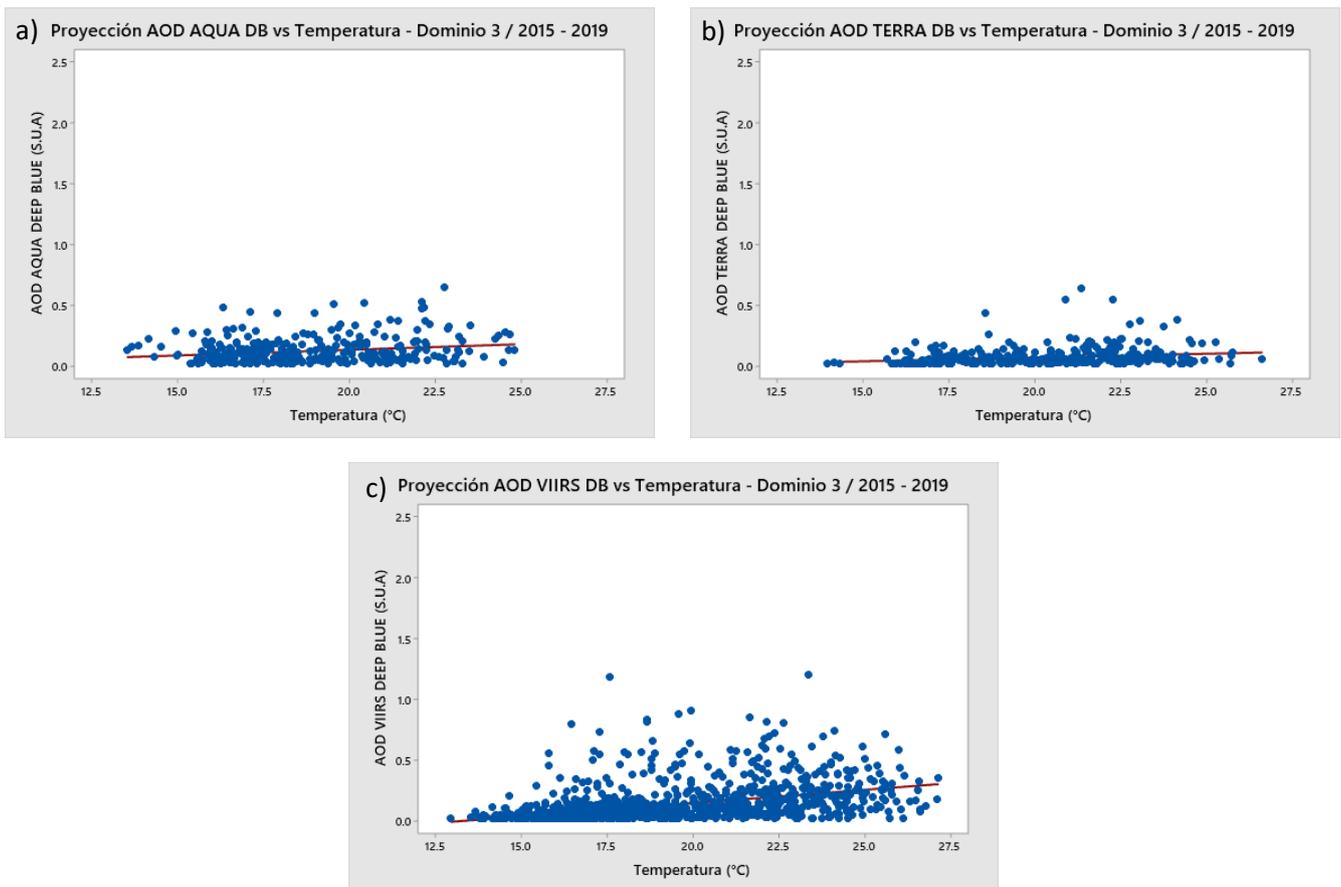


Figura N°48: Proyección de información de AOD del algoritmo Deep Blue sobre el parámetro de Temperatura del Dominio 03, obtenido de MODIS, VIIRS y SENAMHI: a) AOD – AQUA Deep Blue Dominio 03, b) AOD – TERRA Deep Blue Dominio 03 y c) AOD – VIIRS Deep Blue Dominio 03.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

En la Figura N°49, se muestran los gráficos de Proyecciones de la información satelital de AOD en el algoritmo Dark Target sobre el parámetro meteorológico de Humedad Relativa. En la Figura 49-a se presenta la proyección de la información de AOD del satélite AQUA sobre el parámetro de Humedad Relativa, donde presenta un  $R^2$  de 0.27 con una pendiente negativa para la información evaluada; mientras que para la figura 49-b representado para la información de AOD en el satélite TERRA el valor de  $R^2$  es de 0.23 y con una pendiente negativa al igual que la figura 49-a. Finalmente, la figura 49-c evaluado para la información de AOD en el satélite SUOMI NPP presenta un valor de  $R^2$  de 0.23 y con una pendiente negativa y del doble de valor aproximadamente comparado con los otros dos satélites evaluados; así mismo se puede verificar que para las gráficas presentadas, se tiene que la información es muy dispersa.

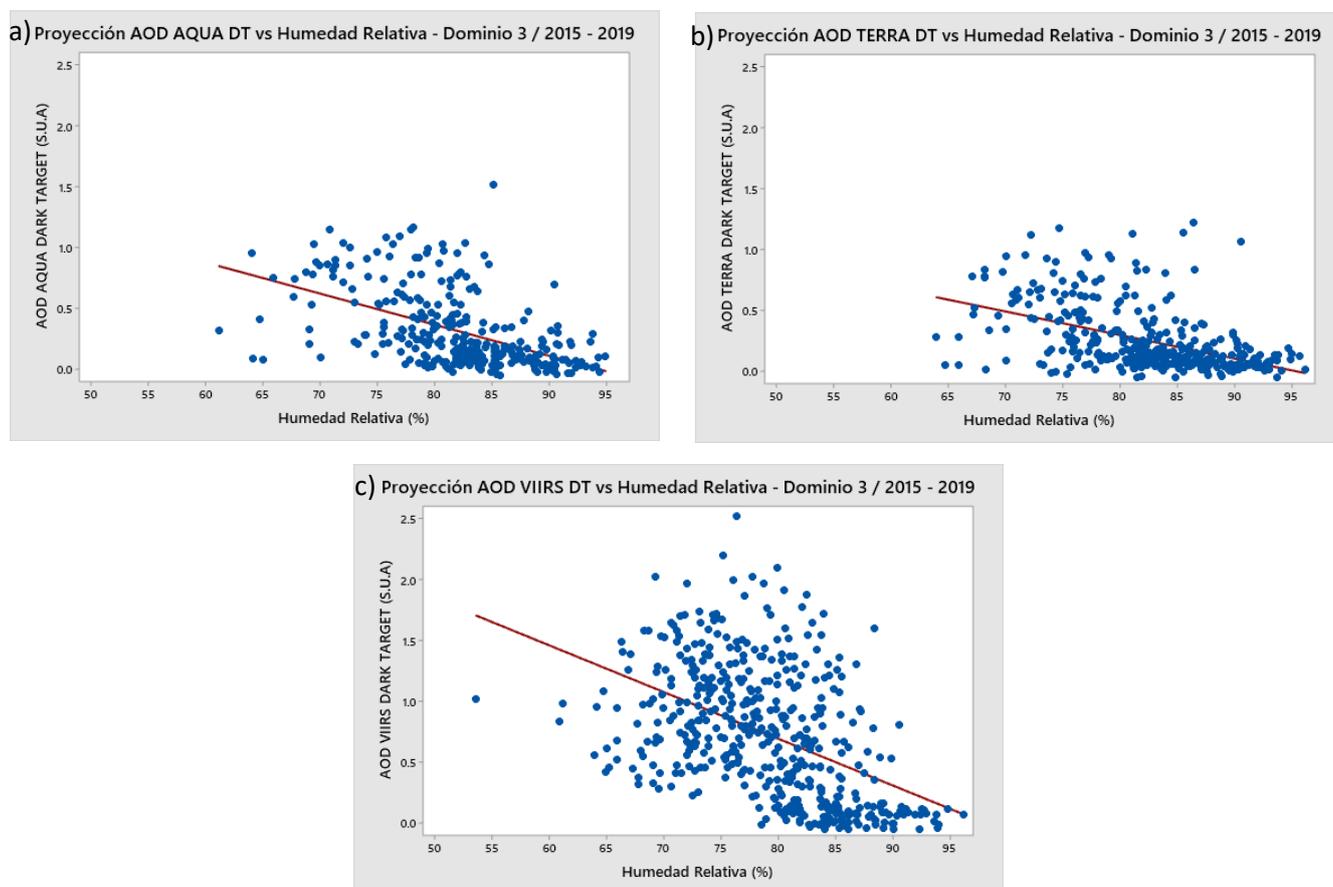


Figura N°49: Proyección de información de AOD del algoritmo Dark Target sobre el parámetro de Humedad Relativa del Dominio 03, obtenido de MODIS, VIIRS y SENAMHI: a) AOD – AQUA Dark Target Dominio 03, b) AOD – TERRA Dark Target Dominio 03 y c) AOD – VIIRS Dark Target Dominio 03.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

En la Figura N°50, se muestran los gráficos de Proyecciones de la información satelital de AOD en el algoritmo Deep Blue sobre el parámetro meteorológico de Humedad Relativa. En la Figura 50-a se presenta la proyección de la información de AOD del satélite AQUA sobre el parámetro de Humedad Relativa, donde presenta un  $R^2$  de 0.03 con una pendiente negativa para la información evaluada; mientras que para la figura 50-b representado para la información de AOD en el satélite TERRA el valor de  $R^2$  es de 0.02 y con una pendiente negativa al igual que la figura 50-a. Finalmente, la figura 50-c evaluado para la información de AOD en el satélite SUOMI NPP presenta un valor de  $R^2$  de 0.12 y con una pendiente negativa y del triple de valor aproximadamente comparado con los otros dos satélites evaluados, se tiene que la información en las gráficas presentadas son poco dispersas.

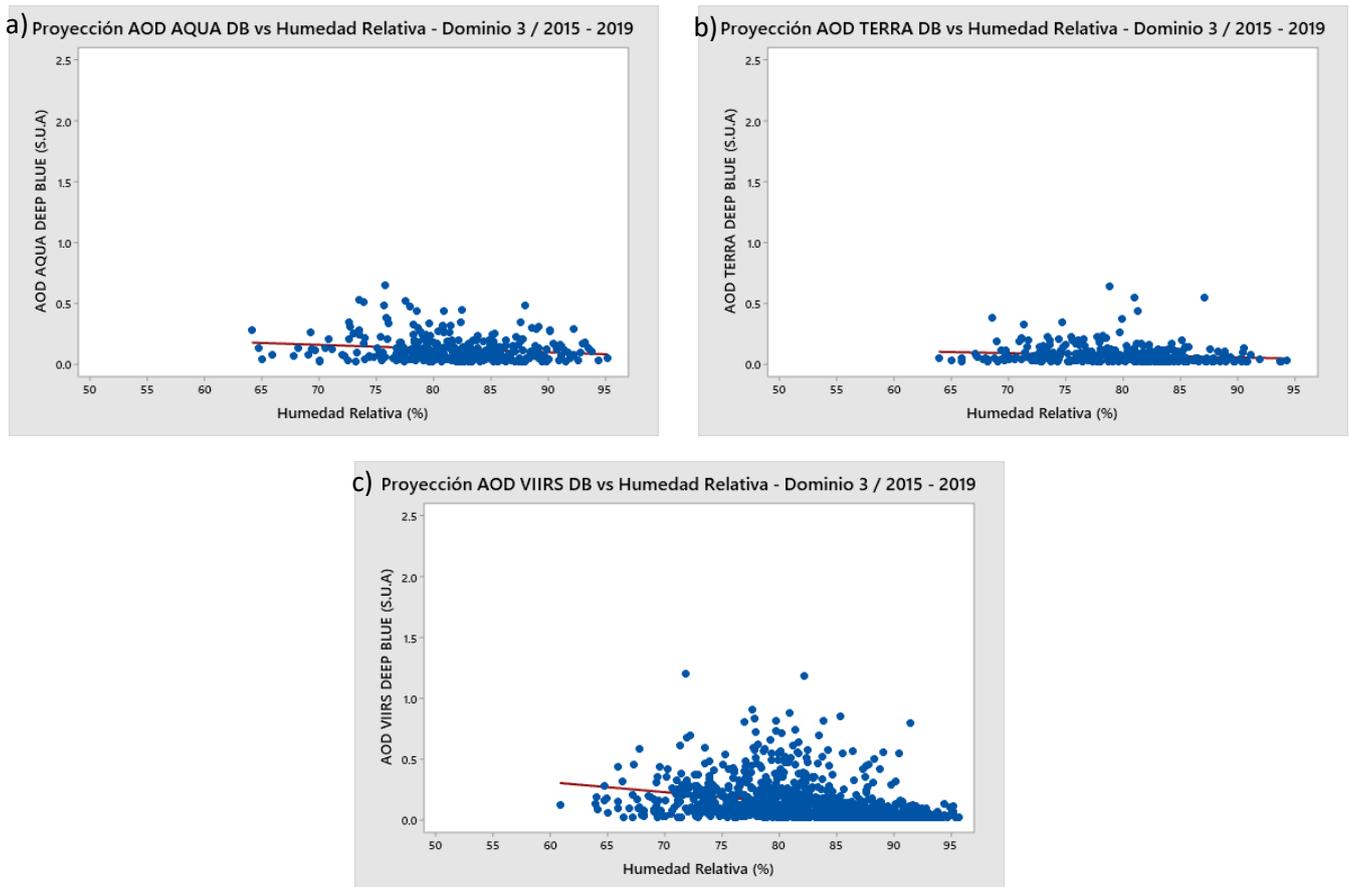


Figura N°50: Proyección de información de AOD del algoritmo Deep Blue sobre el parámetro de Humedad Relativa del Dominio 03, obtenido de MODIS, VIIRS y SENAMHI: a) AOD – AQUA Deep Blue Dominio 03, b) AOD – TERRA Deep Blue Dominio 03 y c) AOD – VIIRS Deep Blue Dominio 03.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

En la Figura N°51, se muestran los gráficos de Proyecciones de la información satelital de AOD en el algoritmo Dark Target sobre el parámetro meteorológico de Velocidad de Viento. En la Figura 51-a se presenta la proyección de la información de AOD del satélite AQUA sobre el parámetro de Velocidad de Viento, donde presenta un  $R^2$  de 0.02 con una pendiente positiva para la información evaluada; mientras que para la figura 51-b representado para la información de AOD en el satélite TERRA el valor de  $R^2$  es de 0.02 y con una pendiente positiva al igual que la figura 51-a. Finalmente, la figura 51-c evaluado para la información de AOD en el satélite SUOMI NPP presenta un valor de  $R^2$  de 0.08 y con una pendiente positiva y del triple de valor aproximadamente comparado con los otros dos satélites evaluados, se tiene que la información en las gráficas presentadas son muy dispersas.

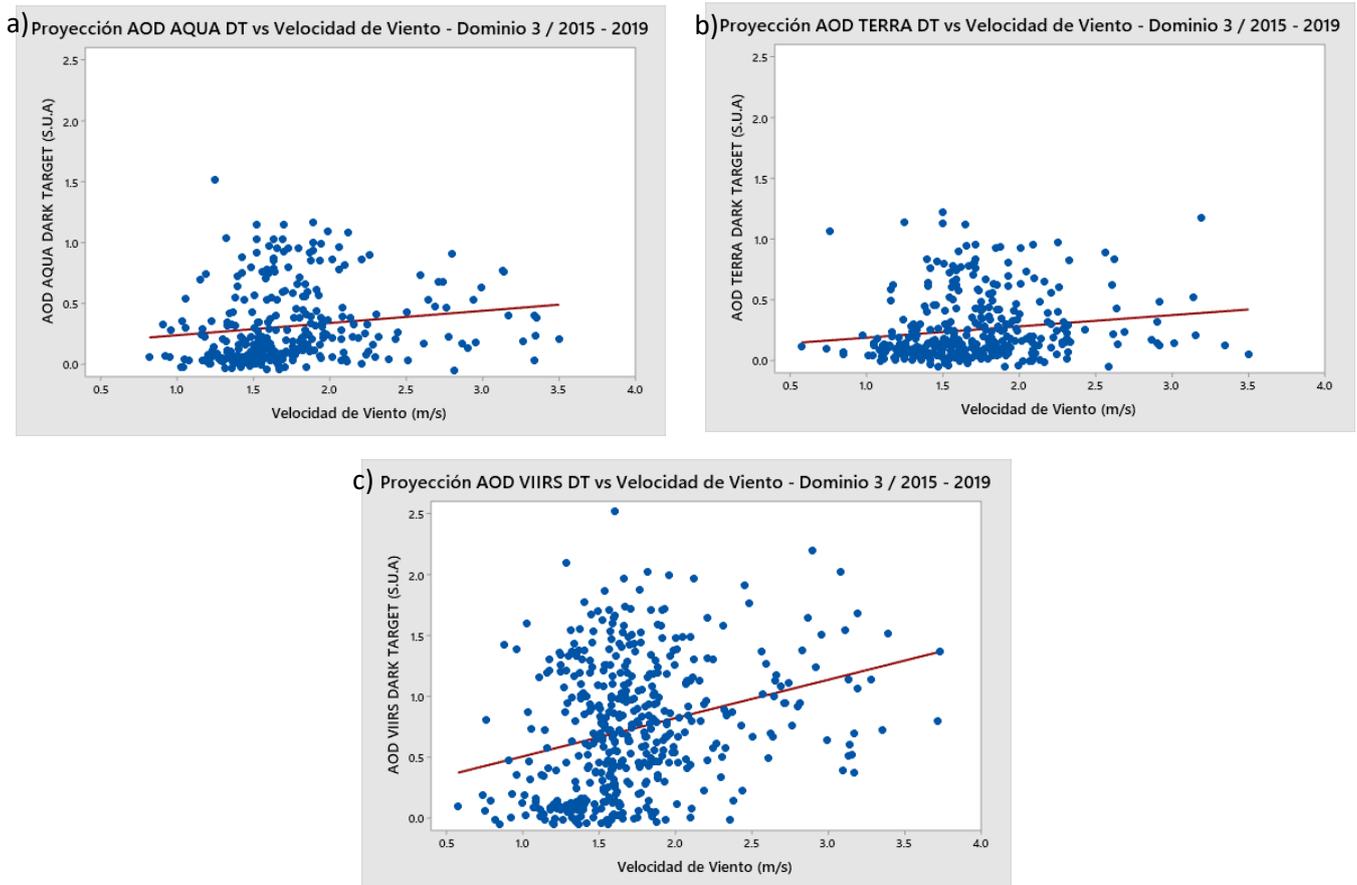


Figura N°51: Proyección de información de AOD del algoritmo Dark Target sobre el parámetro de Velocidad de Viento del Dominio 03, obtenido de MODIS, VIIRS y SENAMHI: a) AOD – AQUA Dark Target Dominio 03, b) AOD – TERRA Dark Target Dominio 03 y c) AOD – VIIRS Dark Target Dominio 03.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

En la Figura N°52, se muestran los gráficos de Proyecciones de la información satelital de AOD en el algoritmo Deep Blue sobre el parámetro meteorológico de Velocidad de Viento. En la Figura 52-a se presenta la proyección de la información de AOD del satélite AQUA sobre el parámetro de Velocidad de Viento, donde presenta un  $R^2$  de 0.00 con una pendiente negativa para la información evaluada; mientras que para la figura 52-b representado para la información de AOD en el satélite TERRA el valor de  $R^2$  es de 0.01 y con una pendiente negativa al igual que la figura 52-a. Finalmente, la figura 52-c evaluado para la información de AOD en el satélite SUOMI NPP presenta un valor de  $R^2$  de 0.01 y con una pendiente positiva y del doble de valor aproximadamente comparado con los otros dos satélites evaluados, se tiene que la información en las gráficas presentadas son poco dispersas.

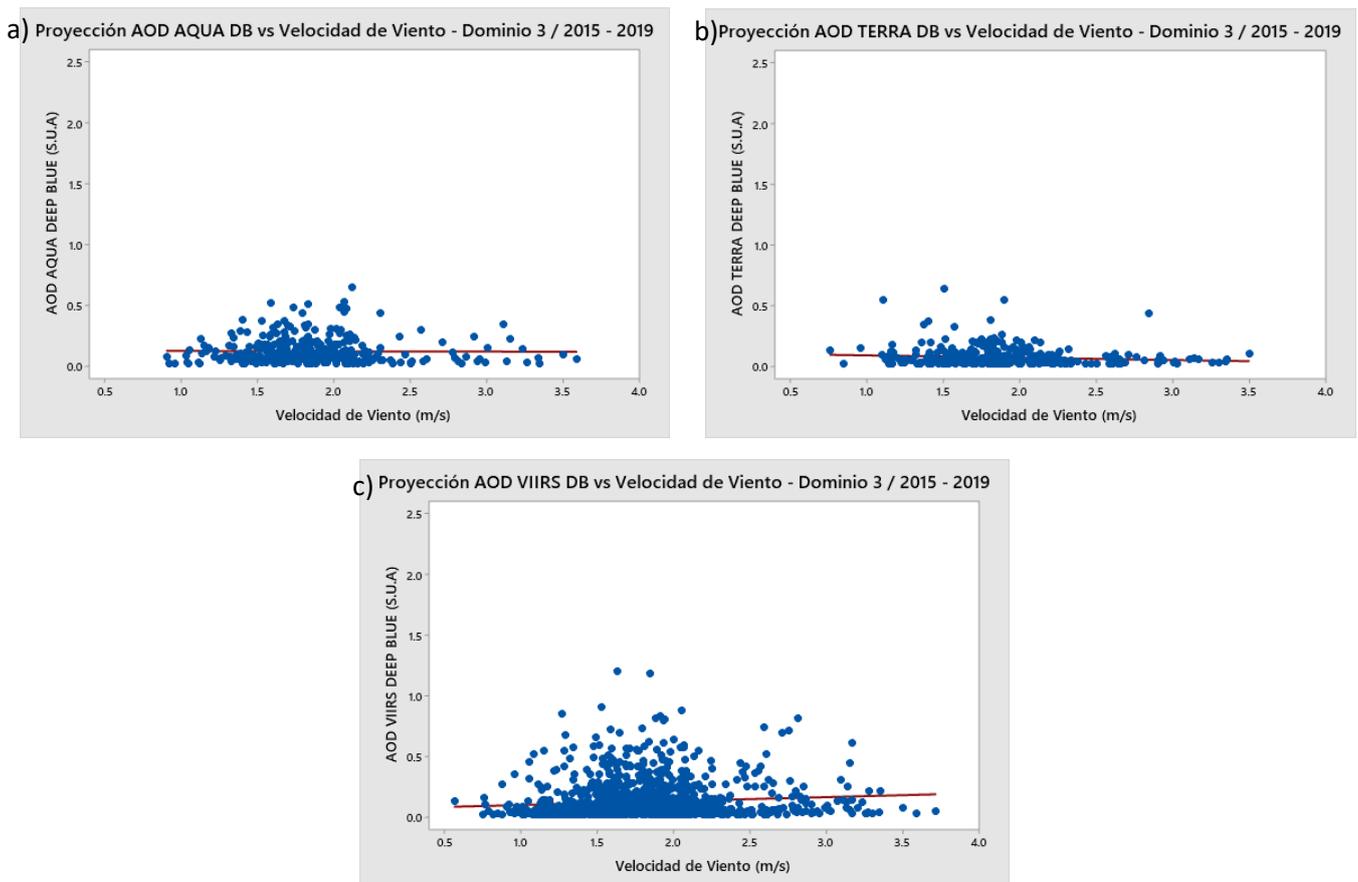


Figura N°52: Proyección de información de AOD del algoritmo Deep Blue sobre el parámetro de Velocidad de Viento del Dominio 03, obtenido de MODIS, VIIRS y SENAMHI: a) AOD – AQUA Deep Blue Dominio 03, b) AOD – TERRA Deep Blue Dominio 03 y c) AOD – VIIRS Deep Blue Dominio 03.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

Una vez determinado los dominios de mayor porcentaje de disponibilidad de datos, se aplicó el Test de Mann Kendall y Pendiente de Sen a los conjuntos de datos de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , AOD – AQUA Dark Target, AOD – TERRA Dark Target, AOD – AQUA Deep Blue, AOD – TERRA Deep Blue, AOD – VIIRS Dark Target y AOD – VIIRS Deep Blue, tanto para los dominios N°01 y N°02 (25kmx25km) como para el dominio N°03 (50kmx50km). Para la aplicación del método estadístico mencionado, se dividieron los datos en dos subconjuntos, el primero llamado “datos filtrados”, es decir, es el conjunto de datos apareada entre los datos de calidad de aire con datos satelitales (AOD) para una fecha determinada; y el segundo llamado como “datos no filtrados”, referido a que no se diferencian si los datos de calidad de aire y dato satelital se encuentren apareadas. En este caso se trabajará con tendencias positivas y negativas, donde una tendencia positiva se refiere a que la recta empieza a ascender, mientras que una tendencia negativa se refiere a que la recta empieza a descender.

A partir de estos subconjuntos se hallaron los valores de “n”, “Z”, “p-value”, “S” y “Pendiente de Sen”, los cuales son datos que resultan de aplicar el Test de Mann Kendall y Pendiente de Sen. Se utilizó el programa R-Studio, donde viene consigo un script de aplicación del método estadístico.

Una vez aplicado el método estadístico para el subconjunto de “datos no filtrados”, se realizó una tabla resumen con las tendencias que tenía cada conjunto de datos antes mencionado, tal y como se muestra en las Tablas N°14, N°15 y N°16. Tendencia positiva se refiere a una tendencia ascendente, mientras que tendencia negativa se refiere a una tendencia descendente.

**Tabla N°14.** Tendencias para datos de parámetros de AOD VS Datos en tierra en el **Dominio N°01** (25kmx25km) para el periodo 2015 – 2019.

PM	Tierra	Satelite	DT/DB	Dominio	Tendencia
PM10	Tierra	No aplica	No aplica	25x25 (D1)	NEGATIVO
PM2.5	Tierra	No aplica	No aplica	25x25 (D1)	POSITIVO
		AQUA	DT	25x25 (D1)	POSITIVO
		TERRA	DT	25x25 (D1)	NEGATIVO
		AQUA	DB	25x25 (D1)	POSITIVO
		TERRA	DB	25x25 (D1)	POSITIVO
		VIRRS	DB	25x25 (D1)	POSITIVO
		VIRRS	DT	25x25 (D1)	NEGATIVO

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

**Tabla N°15.** Tendencias para datos de parámetros de AOD VS Datos en tierra en el **Dominio N°02 (25kmx25km)** para el periodo 2015 – 2019.

PM	Tierra	Satelite	DT/DB	Dominio	Tendencia
PM10	Tierra	No aplica	No aplica	25x25 (D2)	NEGATIVO
PM2.5	Tierra	No aplica	No aplica	25x25 (D2)	POSITIVO
		AQUA	DT	25x25 (D2)	POSITIVO
		TERRA	DT	25x25 (D2)	NEGATIVO
		AQUA	DB	25x25 (D2)	POSITIVO
		TERRA	DB	25x25 (D2)	POSITIVO
		VIIRS	DB	25x25 (D2)	NEGATIVO
		VIIRS	DT	25x25 (D2)	NEGATIVO

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

**Tabla N°16.** Tendencias para datos de parámetros de AOD VS Datos en tierra en el **Dominio "50kmx50km"** para el periodo 2015 – 2019.

PM	Tierra	Satelite	DT/DB	Dominio	Tendencia
PM10	Tierra	No aplica	No aplica	50x50	NEGATIVO
PM2.5	Tierra	No aplica	No aplica	50x50	POSITIVO
		AQUA	DT	50x50	NEGATIVO
		TERRA	DT	50x50	NEGATIVO
		AQUA	DB	50x50	POSITIVO
		TERRA	DB	50x50	POSITIVO
		VIIRS	DB	50x50	NEGATIVO
		VIIRS	DT	50x50	NEGATIVO

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Como resultado de aplicar los métodos estadísticos del Test de Mann Kendall y Pendiente de Sen, se obtuvo las Tablas N° 14, N°15 y N°16, posterior a ello se realizó un análisis de las tendencias obtenidas para cada dominio, de tal manera que se obtuvo como resultado lo siguiente:

Para el Dominio N°01 (25kmx25km):

- Tendencia positiva entre AOD - AQUA Dark Target y  $PM_{2.5}$
- Tendencia negativa entre AOD - TERRA Dark Target y  $PM_{10}$
- Tendencia positiva entre AOD - AQUA Deep Blue y  $PM_{2.5}$
- Tendencia positiva entre AOD - TERRA Deep Blue y  $PM_{2.5}$
- Tendencia positiva entre AOD - VIIRS Deep Blue y  $PM_{2.5}$
- Tendencia negativa entre AOD - VIIRS Dark Target y  $PM_{10}$

Para el Dominio N°02 (25kmx25km):

- Tendencia positiva entre AOD - AQUA Dark Target y  $PM_{2.5}$
- Tendencia negativa entre AOD - TERRA Dark Target y  $PM_{10}$
- Tendencia positiva entre AOD - AQUA Deep Blue y  $PM_{2.5}$
- Tendencia positiva entre AOD - TERRA Deep Blue y  $PM_{2.5}$
- Tendencia negativa entre AOD - VIIRS Deep Blue y  $PM_{10}$
- Tendencia negativa entre AOD - VIIRS Dark Target y  $PM_{10}$

Para el Dominio “50kmx50km”:

- Tendencia negativa entre AOD - AQUA Dark Target y  $PM_{10}$
- Tendencia negativa entre AOD - TERRA Dark Target y  $PM_{10}$
- Tendencia positiva entre AOD - AQUA Deep Blue y  $PM_{2.5}$
- Tendencia positiva entre AOD - TERRA Deep Blue y  $PM_{2.5}$
- Tendencia negativa entre AOD - VIIRS Deep Blue y  $PM_{10}$
- Tendencia negativa entre AOD - VIIRS Dark Target y  $PM_{10}$

La Tabla N°17, muestra el resumen de las tendencias a las cuales sigue cada conjunto de datos de AOD AQUA DT, AOD AQUA DB, AOD TERRA ST, AOD TERRA DB, AOD VIIRS DT y AOD VIIRS DB “no filtrado” (datos totales de MP y AOD sin considerar su par por fecha). AOD es la medida en que los aerosoles reducen la transmisión de la luz, sea por efecto de dispersión o absorción, debido a partículas en suspensión presentes en la columna atmosférica (Como se cita en (Llorente, 2017)). Se presenta de manera resumida las tendencias que se hallaron al evaluar el conjunto de datos satelitales y que fueron presentadas en las Tablas N°14, N°15 y N°16; y se puede observar como ejemplo que para el Dominio N°01, el algoritmo Deep Blue en todos los satélites presentan una tendencia positiva similar a la tendencia de  $PM_{2.5}$  (tendencia creciente).

**Tabla N°17.** Tendencias de parámetros de AOD en los Dominios N°01, N°02 y 50kmx50km para el periodo 2015 – 2019

Dominio	AQUA DT	AQUA DB	TERRA DT	TERRA DB	VIIRS DT	VIIRS DB
Dominio 1 (25x25)	PM2.5	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
Dominio 2 (25x25)	PM2.5	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM10
Dominio 50X50	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM10

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Luego, se determina porcentajes de tendencias que presentan los datos de AOD en los diferentes satélites y algoritmos hacia  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . En la Tabla N°18 se presenta el porcentaje de tendencia que presentan los datos de AOD para los satélites AQUA, TERRA y SUOMI NPP para los algoritmos Dark Target y Deep Blue, obteniendo como resultado que para el satélite AQUA en ambos algoritmos se presenta mayor porcentaje de tendencia positiva (ascendente) igual que  $PM_{2.5}$ , mientras que para el satélite TERRA, el algoritmo Dark Target presenta una tendencia negativa (descendente) igual que  $PM_{10}$  y el algoritmo Deep Blue presenta una tendencia positiva (ascendente) igual que  $PM_{2.5}$ . Finalmente, el instrumento VIIRS en sus dos algoritmos tienen un alto porcentaje de tendencia negativa (descendente) igual que  $PM_{10}$ .

**Tabla N°18.** Porcentaje de tendencia de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  **agrupando los tres dominios para algoritmos en el periodo 2015 – 2019**

		PM10	PM2.5	TOTAL
AQUA	Dark Target	33.3%	66.6%	100%
	Deep Blue	0	100%	100%
TERRA	Dark Target	100%	0	100%
	Deep Blue	0	100%	100%
VIIRS	Dark Target	100%	0	100%
	Deep Blue	66.6%	33.3%	100%

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

En la Tabla N°19 se presenta el porcentaje de tendencia que presentan los datos de AOD para los satélites AQUA, TERRA y SUOMI NPP, y cada dominio evaluado. El resultado de los porcentajes menciona que en el caso del satélite AQUA, los datos de AOD para el Dominio 1 y Dominio 2 presentan un 100% de tendencia positiva (ascendente) igual que  $PM_{2.5}$ ; mientras que para el Dominio N°03, el porcentaje es fraccionado (50% para  $PM_{2.5}$  y 50% para  $PM_{10}$ ), por lo que no se puede llegar a una conclusión.

En el caso del satélite TERRA, los datos de AOD para los Dominios 1, 2 y 3 están divididos para cada parámetro de calidad de aire, por lo que de igual manera no se puede llegar a una conclusión certera. Finalmente, para el satélite Suomi NPP, los datos de AOD para el Dominio N°02 y Dominio N°03 (50kmx50km) tienen un 100% de tendencia negativa (descendente) igual que  $PM_{10}$ ; mientras que para el Dominio N°1, los porcentajes son repartidos en igual proporción para los parámetros de calidad de aire.

**Tabla N°19.** Porcentaje de tendencia de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  **para los dominios N°01, N°02 y "50kmx50km" en el periodo 2015 – 2019**

	AQUA		TERRA		VIIRS	
	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
Dominio 1	0	100%	50%	50%	50%	50%
Dominio 2	0	100%	50%	50%	100%	0
Dominio 50x50	50%	50%	50%	50%	100%	0

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

En la Tabla N°20 se determinó el porcentaje de tendencia que presentan los datos de AOD considerando el algoritmo de Dark Target y Deep Blue, así como los tres Dominios trabajados. De esta forma se obtuvo los porcentajes donde para el caso del algoritmo Deep Blue, en todos los dominios se presenta un alto porcentaje que los datos de AOD tienen tendencia positiva (ascendente) igual que  $PM_{2.5}$ . Por otro lado, el algoritmo de Dark Target presenta una tendencia negativa (descendente) igual que  $PM_{10}$  en los dominios N°02 y N°03 (50kmx50km); mientras que para el Dominio N°01 se presenta mayor tendencia positiva (ascendente) igual que  $PM_{2.5}$ .

**Tabla N°20.** Porcentaje de tendencia de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  para los Dominios N°01, N°02 y "50kmx50km" y por algoritmo Deep Blue y Dark Target, en el periodo 2015 – 2019.

	Deep Blue		Dark Target	
	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
Dominio 1	0	100%	33.3%	66.6%
Dominio 2	33.3%	66.6%	66.6%	33.3%
Dominio 50x50	33.3%	66.6%	100%	0

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

De la misma manera, se realiza una tabla resumen con las tendencias que presenta el subconjunto "datos filtrados", y así determinar las tendencias que siguen cada conjunto de datos cuando se presentan pares de datos para una misma fecha. De esta manera se realizó una tabla resumen con las tendencias que tiene cada conjunto de datos antes mencionado.

Una vez obtenido las tablas con tendencias de los datos presentados, se realizó un análisis de las tendencias obtenidas para cada dominio, de tal manera que se tuvo lo siguiente:

Para el Dominio N°01 (25kmx25km):

1. Tendencia positiva entre AOD - AQUA Dark Target y  $PM_{2.5}$
2. Tendencia negativa entre AOD - TERRA Dark Target y  $PM_{10}$
3. Tendencia positiva entre AOD - AQUA Deep Blue y  $PM_{2.5}$
4. No se presenta tendencia entre AOD - TERRA Deep Blue y  $PM_{2.5}$  o  $PM_{10}$
5. Tendencia positiva entre AOD - VIIRS Deep Blue y  $PM_{2.5}$
6. Tendencia negativa entre AOD - VIIRS Dark Target y  $PM_{2.5}$ ;  $PM_{10}$

**Tabla N°21.** Tendencias para datos de parámetros de AOD VS Datos en tierra en el Dominio N°01 (25kmx25km) para el periodo 2015 – 2019.

PM	Tierra	Satelite	DT/DB	Dominio	Tendencia
PM10	Tierra	AQUA	DT	25x25 (D1)	NEGATIVO
PM2.5	Tierra	AQUA	DT	25x25 (D1)	POSITIVO
		AQUA	DT	25x25 (D1)	POSITIVO
PM10	Tierra	TERRA	DT	25x25 (D1)	NEGATIVO
PM2.5	Tierra	TERRA	DT	25x25 (D1)	POSITIVO
		TERRA	DT	25x25 (D1)	NEGATIVO
PM10	Tierra	AQUA	DB	25x25 (D1)	NEGATIVO
PM2.5	Tierra	AQUA	DB	25x25 (D1)	POSITIVO
		AQUA	DB	25x25 (D1)	POSITIVO
PM10	Tierra	TERRA	DB	25x25 (D1)	NEGATIVO
PM2.5	Tierra	TERRA	DB	25x25 (D1)	NEGATIVO
		TERRA	DB	25x25 (D1)	POSITIVO
PM10	Tierra	VIIRS	DB	25x25 (D1)	NEGATIVO
PM2.5	Tierra	VIIRS	DB	25x25 (D1)	POSITIVO
		VIIRS	DB	25x25 (D1)	POSITIVO
PM10	Tierra	VIIRS	DT	25x25 (D1)	NEGATIVO
PM2.5	Tierra	VIIRS	DT	25x25 (D1)	NEGATIVO
		VIIRS	DT	25x25 (D1)	NEGATIVO

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Para el Dominio N°02 (25kmx25km):

1. No presenta tendencia entre AOD - AQUA Dark Target y  $PM_{10}$
2. Tendencia positiva entre AOD – AQUA Dark Target y  $PM_{2.5}$
3. Tendencia negativa entre AOD – TERRA Dark Target y  $PM_{10}$
4. No presenta tendencia entre AOD - AQUA Deep Blue y  $PM_{10}$
5. Tendencia positiva entre AOD – AQUA Deep Blue y  $PM_{2.5}$
6. No presenta tendencia entre AOD – TERRA Deep Blue y  $PM_{10}$
7. Tendencia positiva entre AOD – TERRA Deep Blue y  $PM_{2.5}$
8. No presenta tendencia entre AOD – VIIRS Deep Blue y  $PM_{10}$
9. No presenta tendencia entre AOD – VIIRS Deep Blue y  $PM_{2.5}$
10. Tendencia negativa entre AOD – VIIRS Dark Target y  $PM_{10}$

**Tabla N°22.** Tendencias para datos de parámetros de AOD VS Datos en tierra en el **Dominio N°02 (25kmx25km)** para el periodo 2015 – 2019.

N°	PM	Tierra	Satelite	DT/DB	Dominio	Tendencia
1	PM10	Tierra	AQUA	DT	25x25 (D2)	NEGATIVO
			AQUA	DT	25x25 (D2)	POSITIVO
2	PM2.5	Tierra	AQUA	DT	25x25 (D2)	POSITIVO
			AQUA	DT	25x25 (D2)	POSITIVO
3	PM10	Tierra	TERRA	DT	25x25 (D2)	NEGATIVO
	PM2.5	Tierra	TERRA	DT	25x25 (D2)	POSITIVO
			TERRA	DT	25x25 (D2)	NEGATIVO
4	PM10	Tierra	AQUA	DB	25x25 (D2)	NEGATIVO
			AQUA	DB	25x25 (D2)	POSITIVO
5	PM2.5	Tierra	AQUA	DB	25x25 (D2)	POSITIVO
			AQUA	DB	25x25 (D2)	POSITIVO
6	PM10	Tierra	TERRA	DB	25x25 (D2)	NEGATIVO
			TERRA	DB	25x25 (D2)	POSITIVO
7	PM2.5	Tierra	TERRA	DB	25x25 (D2)	POSITIVO
			TERRA	DB	25x25 (D2)	POSITIVO
8	PM10	Tierra	VIIRS	DB	25x25 (D2)	NEGATIVO
			VIIRS	DB	25x25 (D2)	POSITIVO
9	PM2.5	Tierra	VIIRS	DB	25x25 (D2)	POSITIVO
			VIIRS	DB	25x25 (D2)	NEGATIVO
10	PM10	Tierra	VIIRS	DT	25x25 (D2)	NEGATIVO
	PM2.5	Tierra	VIIRS	DT	25x25 (D2)	POSITIVO
			VIIRS	DT	25x25 (D2)	NEGATIVO

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

Para el Dominio N°03 (50kmx50km):

1. Tendencia negativa entre AOD - AQUA Dark Target y  $PM_{10}$
2. Tendencia negativa entre AOD - TERRA Dark Target y  $PM_{10}$
3. Tendencia positiva entre AOD - AQUA Deep Blue y  $PM_{2.5}$
4. Tendencia positiva entre AOD - TERRA Deep Blue y  $PM_{2.5}$
5. Tendencia negativa entre AOD - VIIRS Deep Blue y  $PM_{10}$
6. Tendencia negativa entre AOD - VIIRS Dark Target y  $PM_{10}$

**Tabla N°23.** Tendencias para datos de parámetros de AOD VS **Datos en tierra en el Dominio “50kmx50km”** para el periodo 2015 – 2019.

N°	PM	Tierra	Satelite	DT/DB	Dominio	Tendencia
1	PM10	Tierra	AQUA	DT	50X50	NEGATIVO
	PM2.5	Tierra	AQUA	DT	50X50	POSITIVO
			AQUA	DT	50X50	NEGATIVO
2	PM10	Tierra	TERRA	DT	50X50	NEGATIVO
	PM2.5	Tierra	TERRA	DT	50X50	POSITIVO
			TERRA	DT	50X50	NEGATIVO
3	PM10	Tierra	AQUA	DB	50X50	NEGATIVO
	PM2.5	Tierra	AQUA	DB	50X50	POSITIVO
			AQUA	DB	50X50	POSITIVO
4	PM10	Tierra	TERRA	DB	50X50	NEGATIVO
	PM2.5	Tierra	TERRA	DB	50X50	POSITIVO
			TERRA	DB	50X50	POSITIVO
5	PM10	Tierra	VIIRS	DB	50X50	NEGATIVO
	PM2.5	Tierra	VIIRS	DB	50X50	POSITIVO
			VIIRS	DB	50X50	NEGATIVO
6	PM10	Tierra	VIIRS	DT	50X50	NEGATIVO
	PM2.5	Tierra	VIIRS	DT	50X50	POSITIVO
			VIIRS	DT	50X50	NEGATIVO

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

En la Tabla N°24, se muestra el resumen de las tendencias a las cuales sigue el subconjunto de “datos filtrados”. Se presenta de manera resumida las tendencias que se hallaron al evaluar el conjunto de datos satelitales y que fueron presentadas en las Tablas N°21, N°22 y N°23; y se puede observar como ejemplo que para el Dominio N°03, el algoritmo Dark Target presenta en todos los satélites una tendencia similar a la tendencia de  $PM_{10}$  (tendencia negativa).

A esta tabla, se le aplicaron porcentajes de tendencias hacia  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  teniendo en cuenta el satélite y el dominio de estudio; por lo que se obtuvieron las siguientes Tablas N°18, N°19, N°20.

**Tabla N°24.** Tendencias de parámetros de AOD en los **Dominios N°01, N°02 y 50kmx50km** para el periodo 2015 – 2019

Dominio	AQUA DT	AQUA DB	TERRA DT	TERRA DB	VIIRS DT	VIIRS DB
Dominio 1 (25x25)	PM2.5	PM2.5	PM10	NINGUNO	AMBOS	PM2.5
Dominio 2 (25x25)	PM2.5	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	NINGUNO
Dominio 50x50	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM10

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

En la Tabla N°25 se muestra el porcentaje de tendencia que presentan los datos de AOD para los satélites AQUA, TERRA y SUOMI NPP en los diferentes algoritmos, obteniendo como resultado que para el satélite AQUA en ambos algoritmos se presenta mayor porcentaje de tendencia hacia el  $PM_{2.5}$ , mientras que para el satélite TERRA, el algoritmo Dark Target tiene una tendencia a  $PM_{10}$  y el algoritmo Deep Blue presenta una tendencia de 66.6% similar a  $PM_{2.5}$ . Finalmente, el instrumento VIIRS en el algoritmo Dark Target presenta una tendencia hacia  $PM_{10}$  y para Deep Blue, el porcentaje se divide en 33.3% para  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  y ninguno.

**Tabla N°25.** Porcentaje de tendencia de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  agrupando los tres dominios para algoritmos en el periodo 2015 – 2019

		PM10	PM2.5	NINGUNO	AMBOS	TOTAL
AQUA	Dark Target	33.3%	66.6%	0	0	100%
	Deep Blue	0	100%	0	0	100%
TERRA	Dark Target	100%	0	0	0	100%
	Deep Blue	0	66.6%	33.3%	0	100%
VIIRS	Dark Target	66.6%	0	0	33.30%	100%
	Deep Blue	33.3%	33.3%	33.3%	0	100%

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

En la Tabla N°26 se presenta el porcentaje de tendencia que presentan los datos de AOD para los satélites AQUA, TERRA y SUOMI NPP, y cada dominio evaluado. El resultado obtenido menciona que en el caso del satélite AQUA, los datos de AOD para el Dominio 1 y Dominio 2 presentan un 100% de tendencia hacia  $PM_{2.5}$ ; mientras que para el Dominio 3 el porcentaje es fraccionado (50% para  $PM_{2.5}$  y 50% para  $PM_{10}$ ).

En el caso del satélite TERRA, los datos de AOD para los Dominios N°2 y 50kmx50km están divididos para cada parámetro de calidad de aire, mientras que para el Dominio N°1 se tiene tendencia dividida a  $PM_{10}$  y a ninguno de los dos parámetros. Finalmente, para el satélite Suomi NPP, sólo el Dominio N°03 presenta una tendencia definida hacia  $PM_{10}$ , mientras que los demás dominios se encuentran divididos entre  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , ninguno o ambos parámetros de calidad de aire.

**Tabla N°26.** Porcentaje de tendencia de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  para los dominios N°01, N°02 y "50kmx50km" en el periodo 2015 – 2019

	AQUA				
	PM10	PM2.5	NINGUNO	AMBOS	TOTAL
Dominio 1	0	100%	0	0	100%
Dominio 2	0	100%	0	0	100%
Dominio 50x50	50%	50%	0	0	100%

	TERRA				
	PM10	PM2.5	NINGUNO	AMBOS	TOTAL
Dominio 1	50%	0	50%	0	100%
Dominio 2	50%	50%	0	0	100%
Dominio 50x50	50%	50%	0	0	100%

	VIIRS				
	PM10	PM2.5	NINGUNO	AMBOS	TOTAL
Dominio 1	0	50%	0	50%	100%
Dominio 2	50%	0	50%	0	100%
Dominio 50x50	100%	0	0	0	100%

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

En la Tabla N°27 se determinó el porcentaje de tendencia que presentan los datos de AOD considerando el algoritmo de Dark Target y Deep Blue, así como los Dominios trabajados. De esta forma se obtuvieron los porcentajes donde para el caso del algoritmo Deep Blue, en todos los dominios se presenta un alto porcentaje que los datos de AOD tienen tendencia a  $PM_{2.5}$ .

Por otro lado, en el algoritmo de Dark Target se obtuvo una tendencia hacia  $PM_{10}$  en los dominios N°2 y N°3; mientras que para el Dominio N°1 se presenta una tendencia hacia  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  o ambos parámetros.

**Tabla N°27.** Porcentaje de tendencia de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  para los Dominios N°01, N°02 y "50kmx50km" y por algoritmo Deep Blue y Dark Target, en el periodo 2015 – 2019.

	Deep Blue				
	PM10	PM2.5	NINGUNO	AMBOS	TOTAL
Dominio 1	0	66.6%	33.3%	0	100%
Dominio 2	0	66.6%	33.3%	0	100%
Dominio 50x50	33.3%	66.6%	0	0	100%

	Dark Target				
	PM10	PM2.5	NINGUNO	AMBOS	TOTAL
Dominio 1	33.3%	33.3%	0	33.3%	100%
Dominio 2	66.6%	33.3%	0	0	100%
Dominio 50x50	100%	0	0	0	100%

Fuente: (Elaboración propia, 2021).

## 5 CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

**5.1. Se evaluó la representatividad temporal y espacial de los datos de productos satelitales; así como datos de estaciones de calidad de aire y meteorología para el periodo de 2015 – 2019, abarcando conjuntos de estaciones conocidos como dominio N°01 (25km x 25km), dominio N°02 (25km x 25 km) y dominio N°03 (50 km x 50 km), obteniendo como resultado que, en el dominio más representativo de la ciudad de Lima, dominio 50km x 50km:**

- La serie de tiempo de  $PM_{10}$  obtenidos de SENAMHI para el Dominio N°03 (50km x 50km), el cual representa un promedio de todas las estaciones del SENAMHI. presenta valores que oscilan entre  $10.0 \mu g/m^3$  a  $170.0 \mu g/m^3$  aproximadamente, siendo este último un valor que excede el ECA aire establecido en la legislación peruana ( $100.0 \mu g/m^3$ ). El valor mínimo se presenta en el invierno del año 2019 y el valor máximo se encuentra presenta en verano y otoño. Así mismo, se observó que los datos presentan una ligera oscilación para todo el periodo de tiempo estudiado. El rango de los valores máximos se da entre  $40 \mu g/m^3$  y  $160 \mu g/m^3$ ; mientras que para los valores mínimos el rango se encuentra entre  $10 \mu g/m^3$  y  $80 \mu g/m^3$ .
- En la serie de tiempo de  $PM_{2.5}$  obtenidos de SENAMHI para el Dominio N°03 (50km x 50km), el cual representa un promedio de todas las estaciones del SENAMHI, se concluye que los valores se encuentran en el rango de  $10.0 \mu g/m^3$  a  $100.0 \mu g/m^3$ , siendo los valores máximos que se dan en la transición de la estación de otoño a invierno; sin embargo se observa en la estación de verano para los años del 2015, 2017 y 2018 existe un valor mayor de material Particulado y que cada año el valor aumenta, siendo el 2018 el mayor valor registrado en promedio  $91.4 \mu g/m^3$ ; así mismo, se concluye que la información donde se tiene menor y mayor valor de  $PM_{2.5}$  es en verano (más notable en el 2019) y otoño e invierno respectivamente. El rango de los valores máximos se da entre  $20 \mu g/m^3$  y  $100 \mu g/m^3$ ; mientras que para los valores mínimos el rango se encuentra entre  $10 \mu g/m^3$  y  $30 \mu g/m^3$ .
- En la serie de tiempo del parámetro de Temperatura obtenidos de SENAMHI para el Dominio N°03 (50km x 50km), el cual representa un promedio de todas las estaciones del SENAMHI, se concluye que existe una variación del conjunto de datos desde verano del año 2015 hasta el inicio del verano del 2019. Los valores se encuentran en el rango de  $10^\circ C$  a  $30^\circ C$ , siendo estos mínimos y máximos generados en el año 2019; también se apreció un crecimiento en la amplitud de los valores a través del periodo evaluado. El rango de los valores máximos se da entre  $16^\circ C$  y  $28^\circ C$ ; mientras que el rango de los valores mínimos se encuentra entre  $13^\circ C$  y  $24^\circ C$ .
- En la serie de tiempo del parámetro de Humedad Relativa obtenidos de SENAMHI para el Dominio N°03 (50km x 50km), el cual representa un promedio de todas las estaciones del SENAMHI, se concluye que los valores oscilan entre 50% a 95%, donde los máximos valores se dan en invierno y los mínimos en verano; también, los valores máximos y mínimos en promedio para el Dominio N°03 (50kmx50km) se dan en el año 2019 con un máximo de 95.0% y un mínimo de 53.0% aproximadamente. El rango de

los valores máximos se da entre 75% y 95% para el Dominio N°03; mientras que el rango de los valores mínimos se encuentra entre 50% y 90%.

- En la serie de tiempo de precipitación obtenidos de SENAMHI para el Dominio N°03 (50km x 50km), el cual representa un promedio de todas las estaciones del SENAMHI, se concluye que los valores máximos se presentan en verano y otoño del 2018 y 2019 respectivamente, siendo el máximo presentado en toda la serie de tiempo un valor de 0.20mm. El rango de los valores máximos se da entre 0.0 mm/día y 0.2 mm/día, siendo el máximo valor obtenido en julio del 2019, obteniendo una intensidad de débil.
- En la serie de tiempo del parámetro de velocidad de viento obtenidos de SENAMHI para el Dominio N°03 (50km x 50km), el cual representa un promedio de todas las estaciones del SENAMHI, se concluye que existe una ligera oscilación desde otoño del 2017 hasta inicios de verano en el 2019, donde los mayores valores se dan desde inicios de primavera hasta mitad de verano y los valores mínimos a finales de otoño e inicios de invierno. Sin embargo, esta oscilación se presenta de manera más amplificadas a inicios del 2015 hasta mitad del 2016, con valores más dispersos a finales del año 2015. El rango de los valores máximos entre 1.5 m/s y 4.0 m/s; mientras que el rango de los valores mínimos se encuentra entre 0.5 m/s y 2.0 m/s. Teniendo una denominación en la escala de Beaufort de Flojo (Brisa débil).
- En la serie de tiempo de MODIS-Deep Blue-AQUA para el Dominio N°03 (50km x 50km), el cual representa un promedio de todas las estaciones del SENAMHI, se concluye que los valores evaluados oscilan entre 0.0 SUA a 0.8 SUA, siendo este último valor presentado en verano de manera excepcional. También se observó que los datos no presentan una oscilación de manera anual sin embargo en las estaciones de otoño, invierno, y primavera existe mayor cantidad de ocurrencias y éstos se mantienen en un rango definido.
- En la serie MODIS-Deep Blue-TERRA para el Dominio N°03 (50km x 50km), el cual representa un promedio de todas las estaciones del SENAMHI, se concluye que los valores oscilan entre 0.0 SUA a 0.8 SUA, siendo el valor mínimo que se da en primavera del año 2015 y el valor máximo que se da en las estaciones de otoño en tres de los cinco años de estudio. Así mismo, la información en la serie de tiempo para éste instrumento se mantiene en un rango y que los datos en la serie de tiempo se presentan en mayor cantidad para las estaciones de primavera y otoño.
- Para la serie de tiempo MODIS-Dark Target-AQUA para el Dominio N°03 (50km x 50km), el cual representa un promedio de todas las estaciones del SENAMHI, los valores oscilan entre 0.0 SUA a 1.6 SUA, siendo el valor mínimo que se da en invierno del año 2017 y el valor máximo que se da en verano del 2015. Mientras que para la serie MODIS-Dark Target-TERRA los valores oscilan entre 0.0 SUA a 1.4 SUA, teniendo como valor mínimo el de invierno del año 2018 y el valor máximo presentado en verano del 2015. En el caso de los datos satelitales de TERRA-Dark Target, los datos en la serie de tiempo se dan en mayor proporción para las estaciones de otoño, invierno y primavera; y en menor proporción está la estación de verano.

- La serie de tiempo VIIRS-Deep Blue presentó valores que oscilan entre 0.0 SUA a 1.4 SUA, siendo el valor mínimo que se da en invierno de cada año y el valor máximo en otoño de cada año, con excepción del 2017 donde el mayor valor fue de 1.2 presentándose en primavera. Se observó que los datos con mayor valor se dan en verano y otoño, mientras que para el 2018 y 2019 la situación cambio en primavera el cual también ofreció valores altos de AOD. Así mismo, se concluye que los rangos para los tres satélites en el algoritmo Deep Blue no presentan coincidencia ni ocurrencias, siendo el satélite SUOMI NPP el que tiene un rango del doble a diferencia de los otros dos satélites evaluados.
- Finalmente, en la serie de tiempo VIIRS-Dark Target Blue, los valores oscilan entre 0.0 SUA a 2.3 SUA, siendo los valores mínimos presentados en otoño e invierno de cada año con excepción del año 2016 donde el mayor valor se registró en otoño mas no en invierno por la falta de datos. El máximo valor se presenta en verano de cada año y la mayor cantidad de datos distribuidos son característicos en verano y otoño. Así mismo, se concluye que los rangos para los tres satélites en el algoritmo Dark Tarjet no presentan coincidencia ni ocurrencias, siendo el satélite SUOMI NPP el que tiene un rango del doble a diferencia de los otros dos satélites evaluados.
- En la representación espacial del Dominio 50kmx50km, se concluye que los datos que menos información muestra son las del satélite AQUA, TERRA y SUOMI NPP (VIIRS) para el algoritmo Dark Target en el área estudio delimitado; mientras que para los datos de AOD en los satélites AQUA, TERRA y SUOMI NPP (VIIRS) del algoritmo Deep Blue, dan una representación de mayor cantidad de información, siendo el satélite SUOMI NPP con el instrumento VIIRS, el que mayor cantidad de información para representarlo espacialmente. Los mapas presentados en el capítulo de resultados del algoritmo Deep Blue presentan una distribución de mayor cantidad al lado Este de la delimitación; mientras que para los mapas del algoritmo Dark Target se observa que los datos se encuentran distribuidos por el Noreste, centro y Suroeste del cuadro delimitado.

## **5.2. Se realizó la integración de los productos satelitales y datos obtenidos de calidad de aire y meteorología para el periodo de 2015 – 2019, consolidando bases de datos.**

- Se evaluaron los porcentajes de disponibilidad de datos de cada estación de calidad de aire respecto a la data meteorológica y respecto al AOD establecido para un dominio de 10kmx10km, obteniendo que el porcentaje de disponibilidad de AOD es menor al 5.0% y concluyendo que no es factible el estudio de manera local.
- Trabajar a escala regional mejora el porcentaje de disponibilidad de datos, por lo que esto representa una agrupación de estaciones de calidad de aire para crear Dominios de 25km x 25km llamados Dominio N°01 y N°02; así como un dominio que presenta un buffer de 50km x 50km, éste último abarcó todas las estaciones de calidad de aire.

**5.3. Se realizó el análisis estadístico de la relación existente para el Dominio N°03 entre las variables reportadas de los productos satelitales y datos observados de calidad de aire (Material Particulado) y meteorología (Humedad Relativa, Temperatura y Velocidad de Viento) para el periodo de 2015 – 2019.**

- Para el primer subconjunto de datos trabajado “Datos filtrados” se evaluaron los conjuntos de datos para el Dominio N°01 (25km x 25km), Dominio N°02 (25km x 25km) y Dominio N°03 (50km x 50km), información obtenida del SENAMHI; donde se concluye que, para los primeros dos dominios al tener baja cantidad de datos respecto a los analizados, existe variaciones en el Test de Mann Kendall y Pendiente de Sen con los que no se es posible establecer una tendencia de los conjuntos evaluados en el Dominio N°01 y N°02.
- Para el Dominio N° 03 (50km x 50km) en la información trabajada con el método de proyección de la información de AOD sobre los parámetros meteorológicos, se presenta que para el algoritmo Dark Target en todos los parámetros meteorológicos evaluados presenta más dispersa las proyecciones a comparación que en el algoritmo Deep Blue.
- Para el Dominio N° 03 (50km x 50km) en la información trabajada con el método de proyección de la información de AOD sobre los parámetros meteorológicos, ninguna información de AOD en los diferentes satélites (AQUA, TERRA y SUOMI NPP) y en los diferentes algoritmos (Dark Target y Deep Blue) presentan una curva característica definida respecto a las variables de clima.
- Para el Dominio N° 03 (50km x 50km) en la información trabajada en el satélite AQUA evaluado para el método estadístico de la Pendiente de Sen, existe una tendencia dividida en los algoritmos evaluados, presentándose que un conjunto tiende al parámetro decreciente como el  $PM_{10}$ , mientras que el otro conjunto tiende de manera creciente como el  $PM_{2.5}$  por lo que se concluye que no se puede determinar una tendencia fija para el satélite AQUA en el área de estudio.
- En el caso del satélite TERRA para el dominio 50km x 50km, evaluado para el método estadístico de la Pendiente de Sen, existe la misma tendencia dividida en los algoritmos evaluados, donde un conjunto tiende al parámetro decreciente como el  $PM_{10}$ , mientras que el otro conjunto tiende de manera creciente como el  $PM_{2.5}$ , por lo que de la misma manera se concluye que no se puede determinar una tendencia fija para el satélite TERRA en el área de estudio.
- En el caso del satélite SUOMI NPP con instrumento VIIRS para el dominio 50km x 50km evaluado para el método estadístico de la Pendiente de Sen, se establece una tendencia de ambos algoritmos de manera decreciente del mismo modo que lo hace el parámetro  $PM_{10}$ , donde los algoritmos Dark Tarjet y Deep Blue presentan la misma tendencia para la información evaluada, de tal modo que se concluye que el satélite Suomi NPP es el más apropiado para determinar tendencias de parámetro de  $PM_{10}$  en un área de Dominio 50km x 50km cerca del área evaluada (Ciudad de Lima).

- El satélite SUOMI NPP con instrumento VIIRS para el dominio 50km x 50km a diferencia de los satélites AQUA y TERRA, registra mayor cantidad de datos con lo que se puede concluir que es el más eficiente para determinar las tendencias para un conjunto de datos.

La hipótesis planteada en el presente estudio refiere a demostrar mediante análisis estadístico que la información obtenida de productos satelitales tiene la habilidad de representar datos obtenidos de calidad del aire en la ciudad de Lima. Como se mencionó en las conclusiones, cada satélite de los tres evaluados tiene la habilidad de representar las mismas tendencias de las que presenta el parámetro  $PM_{10}$  para un área de estudio de 50km x 50km, haciendo que la hipótesis planteada sea válida en el presente estudio.

## 6. CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un trabajo donde se tenga un periodo más amplio de evaluación (diez o veinte años), de esta manera se aumenta la cantidad de información y así establecer más dominios donde se puedan evaluar las tendencias de los parámetros de calidad de aire.
- Se recomienda usar otro tipo de satélites como geoestacionarios, debido a que estos pueden brindar mayor cantidad de información al permanecer en una sola zona de estudio y así evaluar con más claridad las tendencias de los parámetros de calidad de aire.
- Se recomienda utilizar otros métodos estadísticos para evaluar la información de productos satelitales, así como la relación que presentan con la información obtenida de calidad de aire de las estaciones convencionales.
- Se recomienda investigar otros instrumentos que presentan los satélites para evaluar no solo los parámetros presentados en el presente estudio, sino otros parámetros que ayuden al entendimiento de la variación de otros contaminantes en la atmosfera en la ciudad de Lima.

## 7. CAPÍTULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad Crespo, L. C. (2016). Estimación de la concentración de material Particulado menor a 10 micras a través de sensores remotos en el área urbana de la ciudad de Cuenca [Título Profesional]. Universidad de Cuenca.
- Bernardi, C. (s. f.). Teledetección. <http://www.essa.ara.mil.ar/cens/MATERIAS%20TERCER%20A%C3%91O/3%C2%B0%20A%C3%91O/09-TELEDETECCION/PRIMER%20CUATRIMESTRE/PRIMER%20CUATRIMESTRE.pdf>
- Cavero, M. (2013). *Satélite Suomi NPP*. Gidahatari. <https://gidahatari.com/ih-es/satelite-suomi-npp>
- Céspedes Rojas, J., Cuero Duque, J. A., & Hernández Torres, F. L. (2015). Metodología para medir las concentraciones de aerosoles atmosféricos usando técnicas de teledetección. *Puente*, 9(2), 61-77. <https://doi.org/10.18566/puente.v9n2.a07>
- Cholan Rodriguez, E. (2016). Distribución espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles y del monóxido de carbono en el Perú relacionado con las quemas de biomasa (2002-2014) [Título Profesional]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Chu, Y., Liu, Y., Li, X., Liu, Z., Lu, H., Lu, Y., Mao, Z., Chen, X., Li, N., Ren, M., Liu, F., Tian, L., Zhu, Z., & Xiang, H. (2016). A Review on Predicting Ground PM<sub>2.5</sub> Concentration Using Satellite Aerosol Optical Depth. *Atmosphere*, 7(129), 25. <https://doi.org/10.3390/atmos7100129>
- Chuevico, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (2da edición). RIALP, S.A.
- Congedo, L. (2017). Breve Introducción a la Teledetección. En *Semi-Automatic Classification Plugin*. <https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/es/latest/index.html>
- Del Hoyo Peña, M. F. A. (2016). Efecto de los aerosoles en la radiación solar y la producción fotovoltaica en Santiago [Título Profesional, Universidad de Chile]. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/143594/Efecto-de-los-aerosoles-en-la-radiaci%3%b3n-solar-y-la-producci%3%b3n-fotovoltaica-en-Santiago.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- 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 [Magister]. Universidad Nacional de Córdoba.
- Diez, C. (2016). Análisis de datos sobre las Islas Baleares. Editorial Académica Española.
- Dong, Z., Yu, X., Li, X., & Dai, J. (2013). Analysis of variation trends and causes of aerosol optical depth in Shaanxi Province using MODIS data. *Chinese Science Bulletin*, 58(35), 4486-4496.  
<https://doi.org/10.1007/s11434-013-5991-z>
- Gaviria, C., Benavides, P., & Tangarife, C. (2011). Contaminación por material Particulado (PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub>) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009). *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 29(3), 241-250.
- Gonzales, R. (2010). Radiación monocromática. Universidad del Valle.
- Hermoza Ayme, N. A. (2017). Variabilidad temporal de espectro óptico de los aerosoles sobre Huayao-Huancayo usando imágenes satelitales [Título Profesional]. Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur.
- IDEAM. (s. f.). La radiación solar y su paso por la atmósfera. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/la-radiacion-solar-y-su-paso-por-la-atmosfera>
- INEI. (2018a). Estadísticas Ambientales, febrero 2018 (Informe Técnico N.º 3; p. 44). INEI.  
[https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/03-informe-tecnico-n03\\_estadisticas-ambientales-feb2018.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/03-informe-tecnico-n03_estadisticas-ambientales-feb2018.pdf)
- INEI. (2018b). Resultados Definitivos de los Censos Nacionales 2017. Provincia de Lima.  
[https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1583/](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1583/)
- Inzunza Bustos, J. C. (2019). Meteorología Descriptiva (1era edición). Universitaria.
- Jinshan, Z., Dahai, L., & Qingliu, Z. (2011). Analysis of the Aerosol Optical Depth and the Air Quality in Qingdao, China. *Journal of Software*, 6(7), 1194-1200.  
<https://doi.org/10.4304/jsw.6.7.1194-1200>

Karszenbaum, H., & Barraza, V. (s. f.). Introducción a la Teledetección Cuantitativa [Conferencia].

<http://files.especializacion-tig.webnode.com/200000030-4858f4952d/3.->

Sistemas%20Satelitales.pdf

Llanque, J. (2004). Efectos de la Contaminación Atmosférica en el clima urbano y calidad ambiental de Arequipa. Cuadernos de investigación urbanística, 37, 95-106.

Llorente, A. (2017). Evaluación de la variabilidad espaciotemporal de la profundidad óptica de aerosoles en la zona carbonífera del Cesar a partir de observaciones satelitales. Universidad Nacional de Colombia.

MINAM. (2005). Ley General del Ambiente—Ley N° 28611. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/06/ley-general-del-ambiente.pdf>

Mishra, G., Ghosh, K., Kumar, A., Kumar, M., Kumar, S., Chintalapati, S., & Tripathi, S. N. (2021). An application of probability density function for the analysis of PM<sub>2.5</sub> concentration during the COVID-19 lockdown period. *Science of the Total Environment*, 782, 10. <https://doi.org/10.1016>

Molina, G., & Rodrigo, M. (2010). Estadística descriptiva en Psicología. [http://ocw.uv.es/ciencias-de-la-salud/pruebas-1/1-3/t\\_09nuevo.pdf](http://ocw.uv.es/ciencias-de-la-salud/pruebas-1/1-3/t_09nuevo.pdf)

Mustapha, A. (2013). Detecting surface water quality trends using Mann-Kendall tests and Sen's slope estimates. *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, 108-114.

NASA. (2021a). *Aqua Project Science*. Aqua Earth-observing satellite mission. <https://aqua.nasa.gov/>

NASA. (2021). *MODIS - MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER*. MODIS. <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>

NASA. (2021b). *TERRA The EOS Flagship*. Terra: the EOS Flagship. <https://terra.nasa.gov/>

Ordóñez, J. M., Aragonés, N., Fernández-Patier, R., Gandarillas, A., Galán, I., & Aránguez, E. (1999). Contaminantes Atmosféricos y su vigilancia. *Revista Española de Salud Pública*, 73(2), 123-132.

Pérez, D. (2007). *Introducción a los Sensores Remotos—Aplicaciones en Geología*.

[http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso\\_SR/Guia\\_Curso\\_sr\\_2007.pdf](http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/Guia_Curso_sr_2007.pdf)

Príncipe, R. (2018). *Estimación de la evapotranspiración en los cultivos alrededor del observatorio de Huancayo mediante sensoramiento remoto* [Universidad Nacional Mayor de San Marcos].

[https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12816/4631/Principe\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12816/4631/Principe_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Pruneau, C. (2017). *Data Analysis Techniques for Physical Scientists*. Cambridge University Press.

<https://www.cambridge.org/core/books/data-analysis-techniques-for-physical-scientists/F362CA4BE2AEFC9D91A6BA5A452D6285>

Represa, N. S., Palomar Vásquez, J., Porta, A. A., & Fernández Sarria, A. (2018). Estudio de la correlación mensual entre AOD obtenido de imágenes MODIS y material particulado para una ciudad costera.

[https://www.researchgate.net/publication/325824628\\_Estudio\\_de\\_la\\_correlacion\\_mensual\\_entre\\_AOD\\_obtenido\\_de\\_imagenes\\_MODIS\\_y\\_material\\_particulado\\_para\\_una\\_ciudad\\_costera/stats](https://www.researchgate.net/publication/325824628_Estudio_de_la_correlacion_mensual_entre_AOD_obtenido_de_imagenes_MODIS_y_material_particulado_para_una_ciudad_costera/stats)

Robeson, S. M., & Steyn, D. G. (1989). A conditional probability density function for forecasting ozone air quality data. *Atmospheric Environment*, 23(3), 689-692.

[https://doi.org/10.1016/0004-6981\(89\)90016-4](https://doi.org/10.1016/0004-6981(89)90016-4)

Rojas Benavente, N. (2014). Estudio de la dinámica del espesor óptico de los aerosoles producidos por las fuentes naturales y antropogénicas a partir de las imágenes del sensor MODIS a bordo del satélite TERRA y AQUA sobre américa del Sur (2000-2012) [Título Profesional]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Sánchez, F. (2011). Aplicación de sensores activos y pasivos en la circulación superficial de mesoescala en la parte sur del Golfo de México (Bahía de Campeche) [Maestro en ciencias]. Instituto Politécnico Nacional.

- Schomwandt, D. (2015). Teledetección aplicada a las ciencias agronómicas y recursos naturales (1a edición). [http://www.siaa.gob.ar/joomla\\_files/images/mapas/ManualSensores.pdf](http://www.siaa.gob.ar/joomla_files/images/mapas/ManualSensores.pdf)
- Senamhi. (2020). Monitoreo de la Calidad de Aire, para Lima Metropolitana. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=calidad-del-aire>
- Silva, Y. (2015). Meteorología [Conferencia]. Tópicos de Física Atmosféricas, Perú.
- Soria, M., & Matar, M. (2016). *Nociones sobre teledetección*. Instituto de Investigaciones Mineras, Universidad Nacional de San Juan. <http://www.unsj.edu.ar/unsjVirtual/cartografiaaplicadaminas/wp-content/uploads/2016/10/Apuntes-de-c%C3%A1tedra-para-Cartograf%C3%ADa-Aplicada.pdf>
- Thenmozhi, M., & Kottiswaran, S. (2016). Analysis of Rainfall Trend Using Mann- Kendall Test and the Sen's slope estimator in udumalpet of tirupur district in Tamil Nadu. *International Journal of Agriculture Science and Research*, 6(2), 131-138.
- Thomson, R., & Emery, W. (2014). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography* (3rd ed.). <https://www.elsevier.com/books/data-analysis-methods-in-physical-oceanography/thomson/978-0-12-387782-6>
- Tzu-Chin, T., Yung-Jyh, J., & D. Allen, C. (2011). Analysis of the relationship between MODIS aerosol optical depth and particulate matter from 2006 to 2008 in Taiwan. *Atmospheric Environment*, 45(27), 4777-4788.
- World Air Quality Report 2018 (p. 21). (2019). [Reporte]. IQAir.
- World Air Quality Report 2019 (p. 34). (2020). [Reporte]. IQAir.

**8. CAPÍTULO VIII: APÉNDICE**

8.1. APÉNDICE A1: Promedios diarios de información de calidad de aire y meteorología de las estaciones meteorológicas de SENAMHI, por estaciones del año.

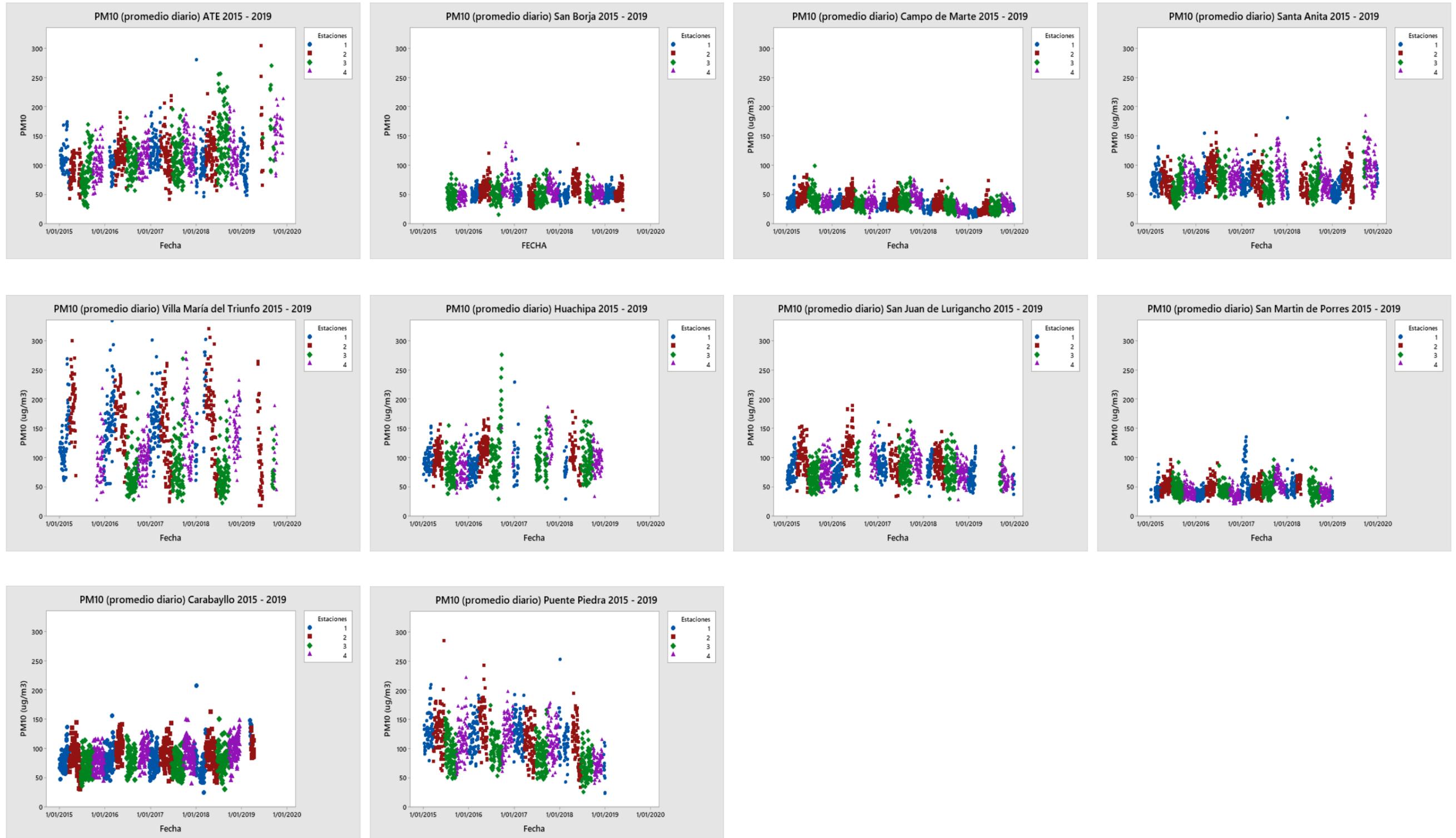


Figura N°52. Promedios de  $PM_{10}$  medidos en estaciones de Lima Metropolitana entre 2015-2019  
 Fuente: (Elaboración propia, 2021)

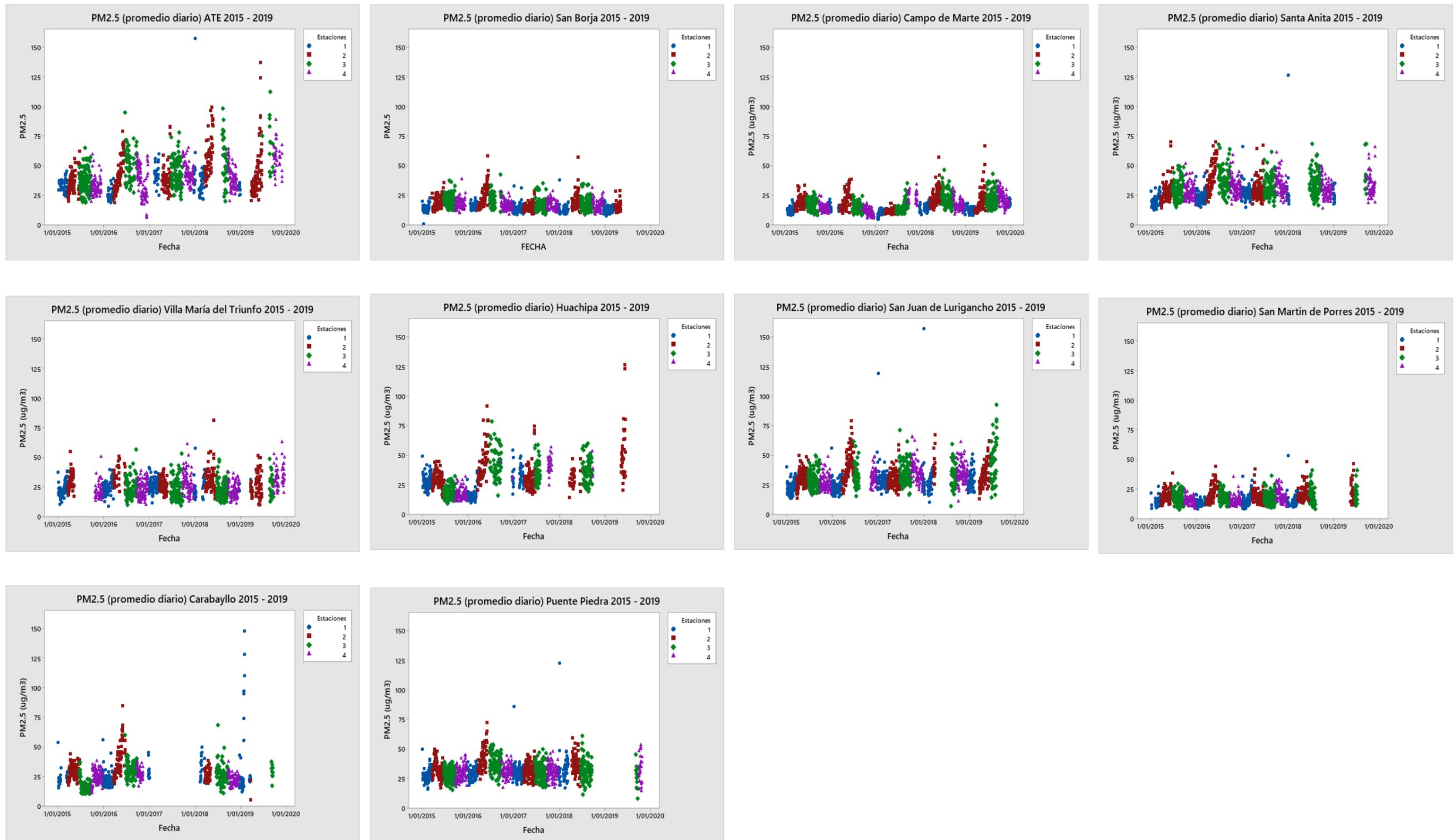


Figura N°53. Promedios de  $PM_{2.5}$  medidos en estaciones de Lima Metropolitana entre 2015-2019  
Fuente: (Elaboración propia, 2021)

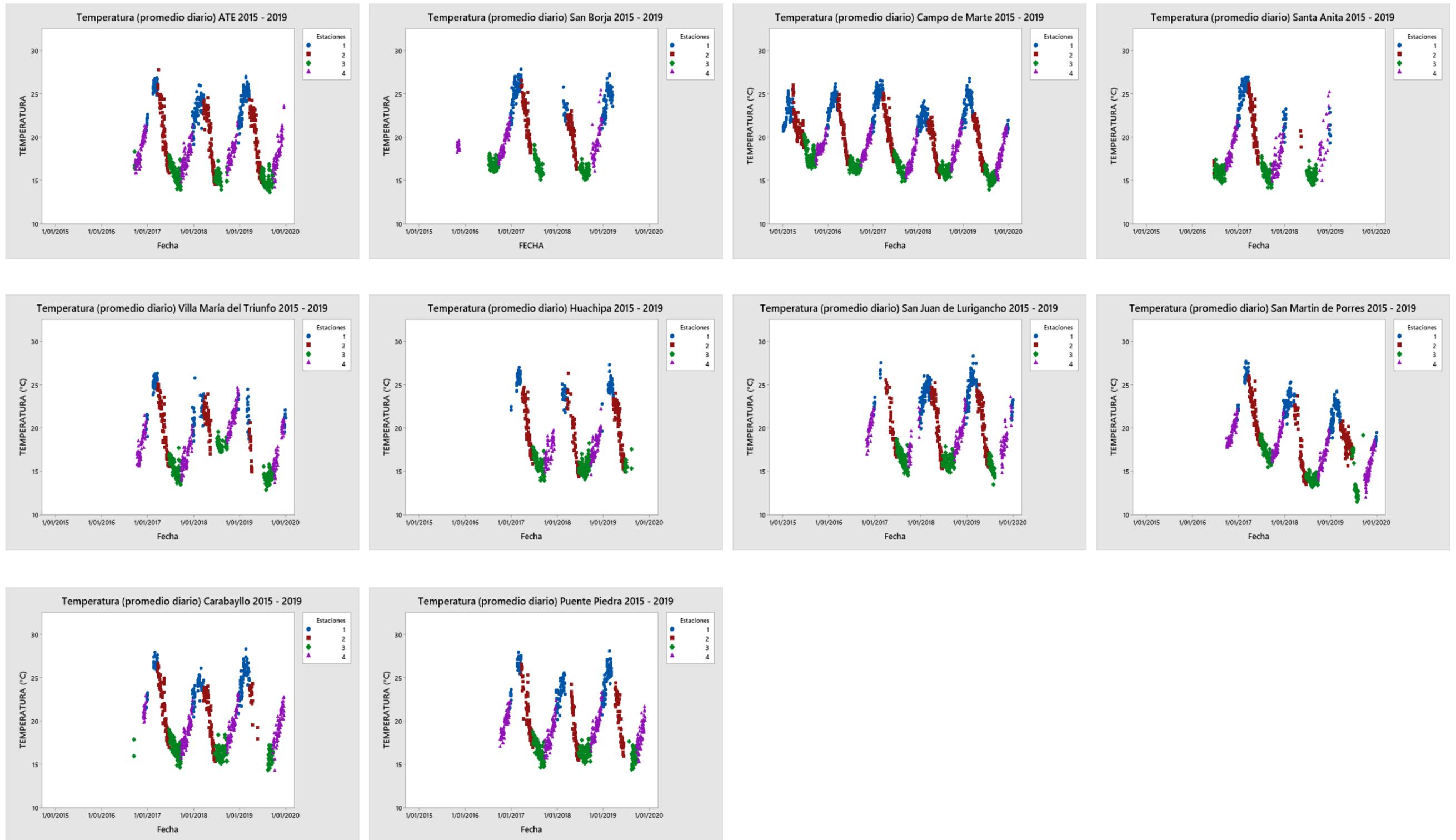


Figura N°54. Promedios de Temperatura medidos en estaciones de Lima Metropolitana entre 2015-2019  
 Fuente: (Elaboración propia, 2021)

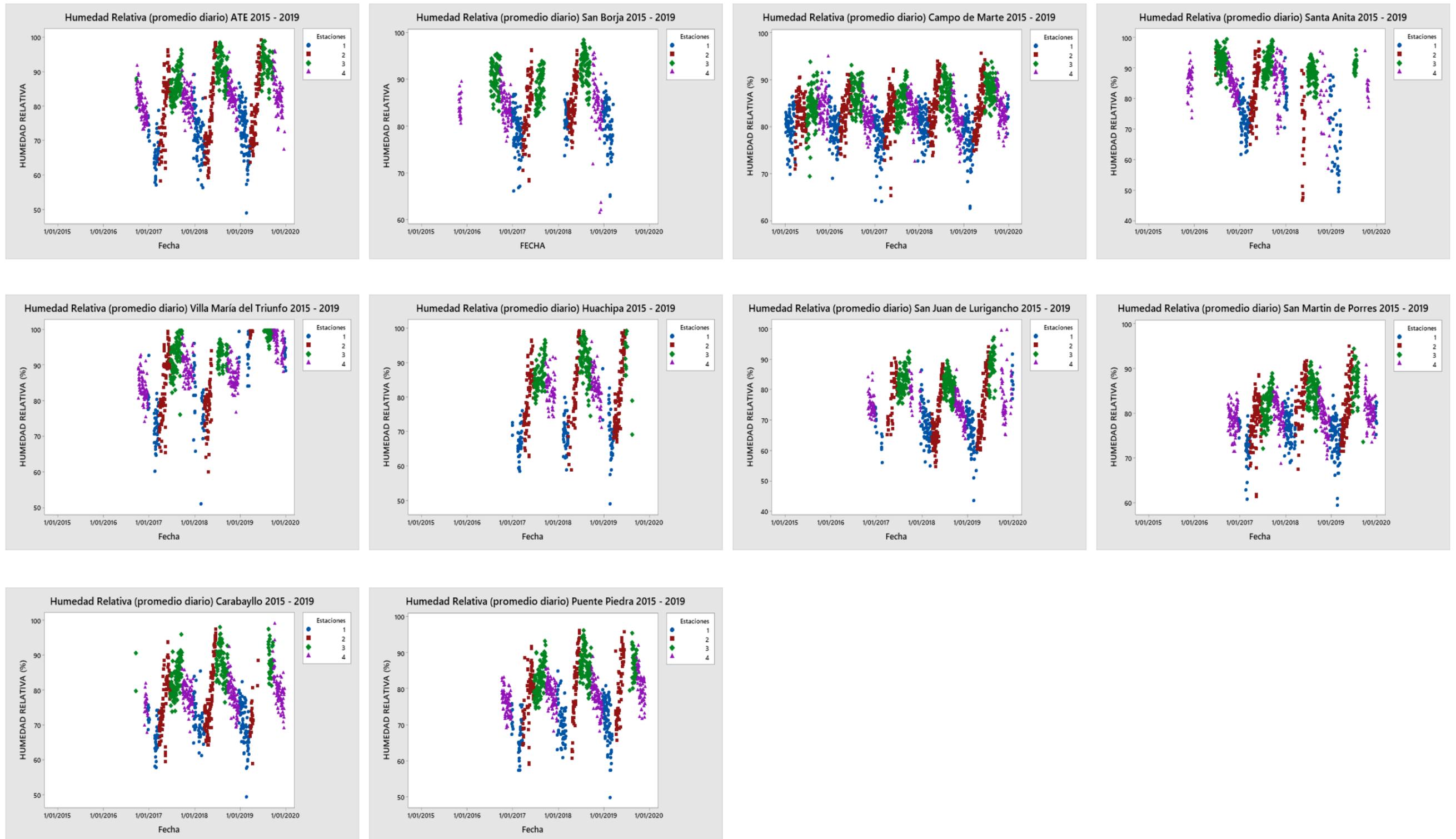


Figura N°55. Promedios de Humedad Relativa medidos en estaciones de Lima Metropolitana entre 2015-2019  
Fuente: (Elaboración propia, 2021)

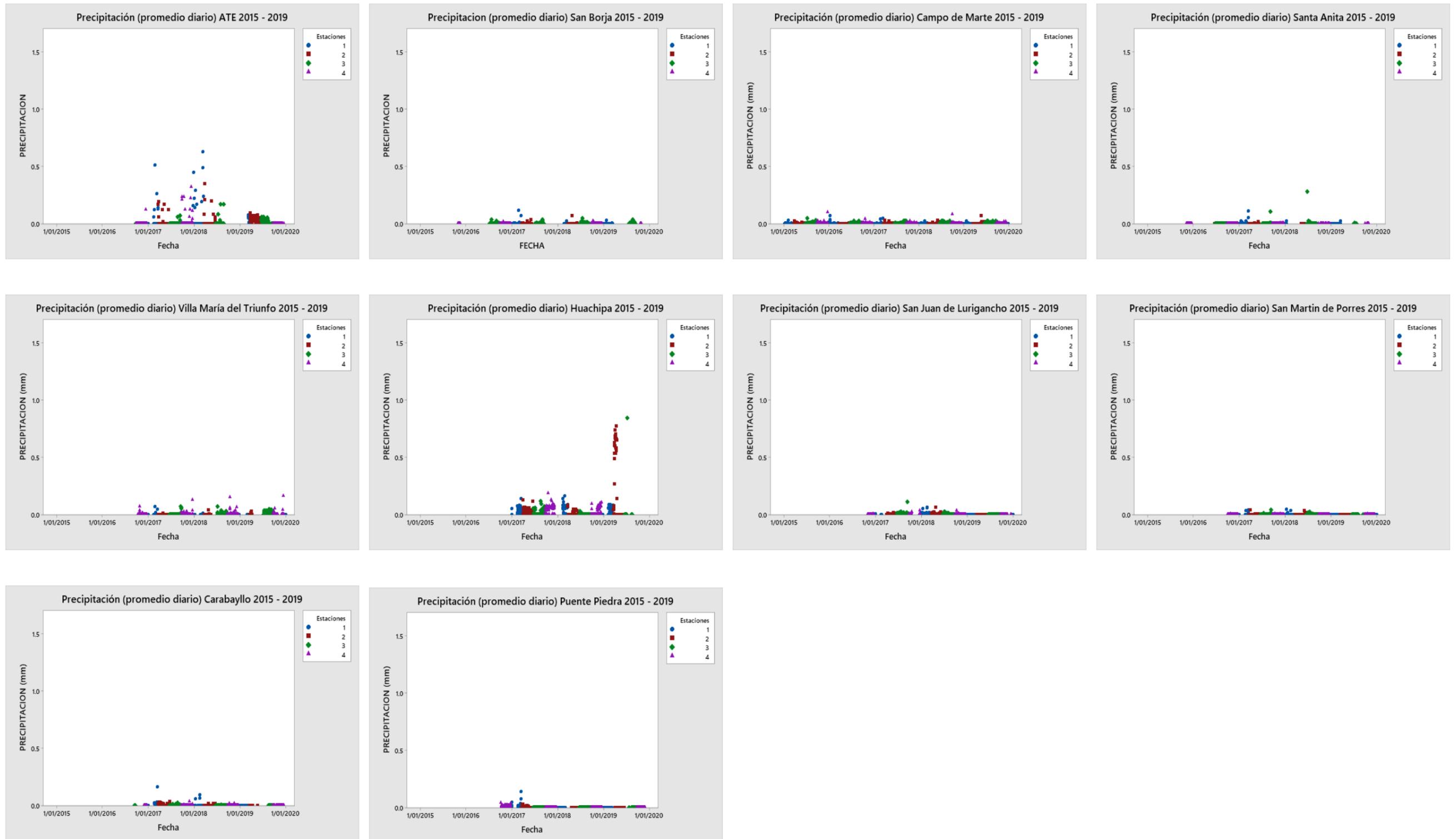


Figura N°56. Promedios de Precipitación medidos en estaciones de Lima Metropolitana entre 2015-2019  
Fuente: (Elaboración propia, 2021)

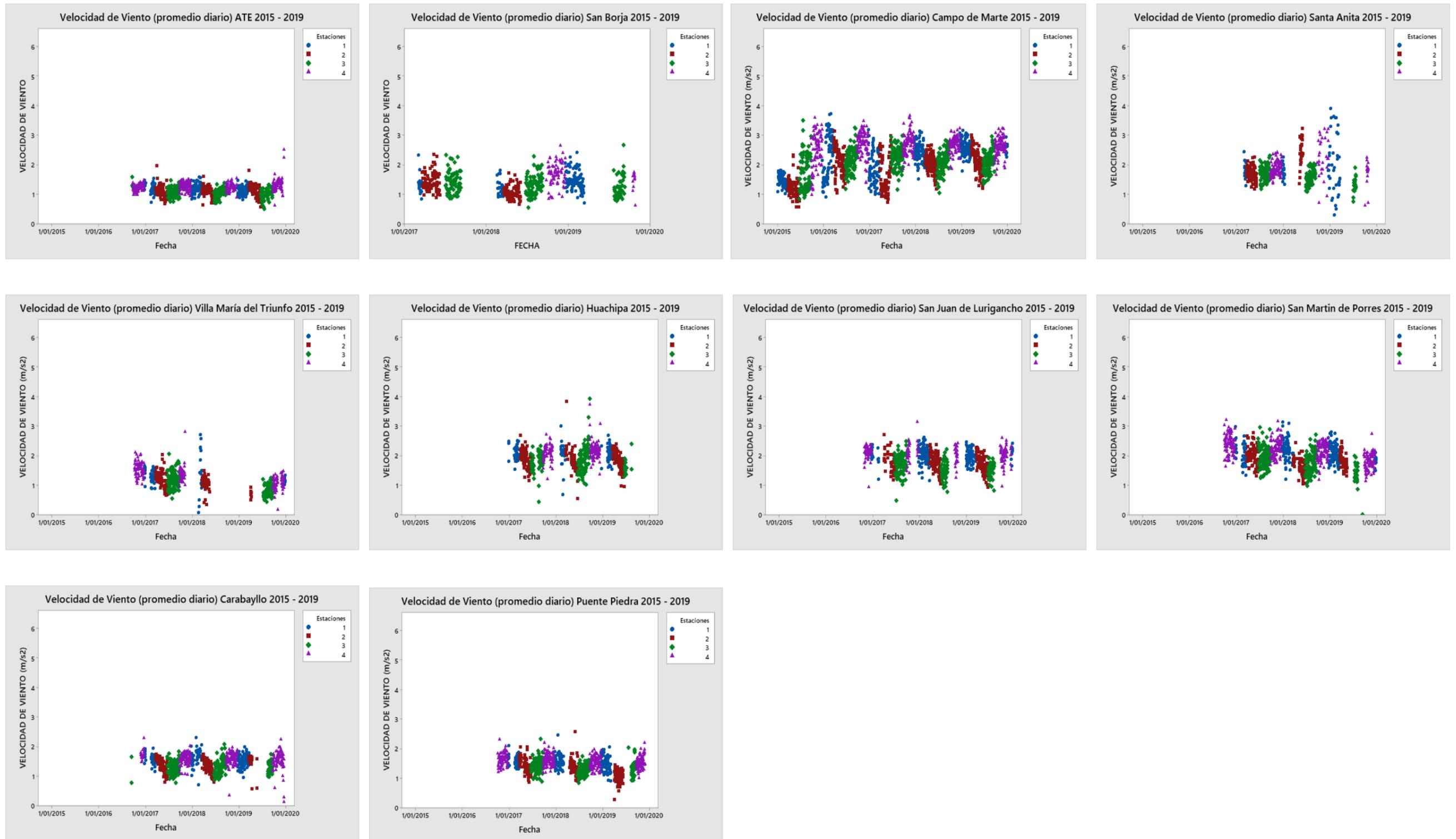


Figura N°57. Promedios de Velocidad de Viento medidos en estaciones de Lima Metropolitana entre 2015-2019  
Fuente: (Elaboración propia, 2021)

8.2. APÉNDICE A2: Información satelital distribuidos alrededor de las estaciones del SENAMHI con buffers de 10kmx10km, 25kmx25km y 50kmx50km.

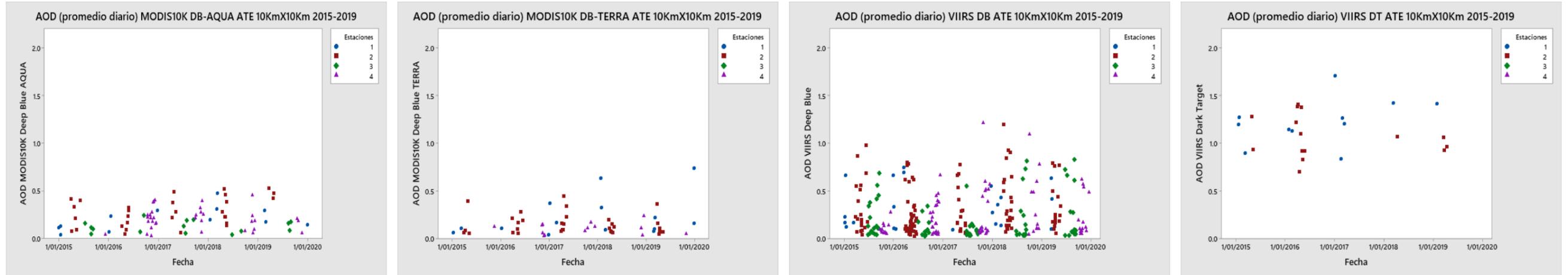


Figura N°58. Promedio de AOD medidos por instrumentos satelitales para la estación ATE 2015-2019  
Fuente: (Elaboración propia, 2021)

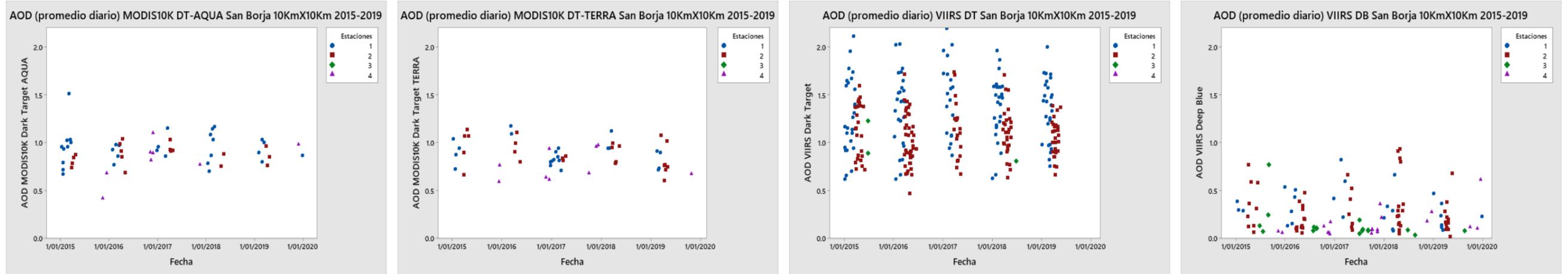


Figura N°59. Promedio de AOD medidos por instrumentos satelitales para la estación San Borja 2015-2019  
Fuente: (Elaboración propia, 2021)

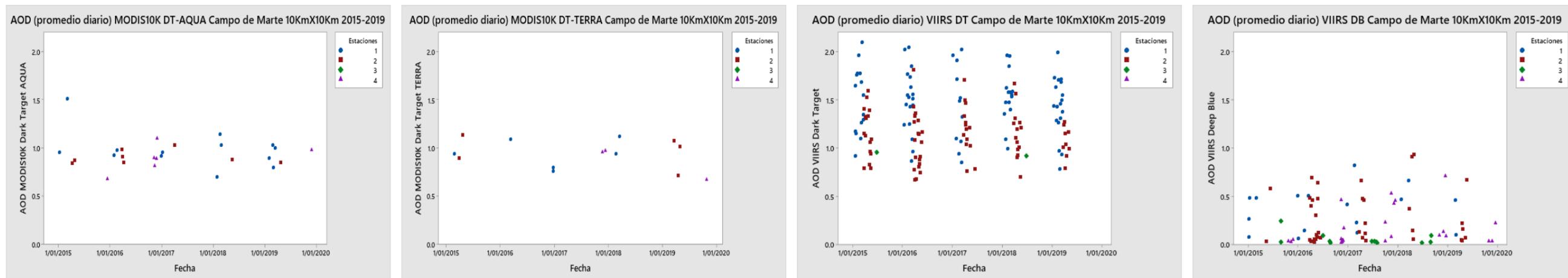


Figura N°60. Promedio de AOD medidos por instrumentos satelitales para la estación Campo de Marte 2015-2019

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

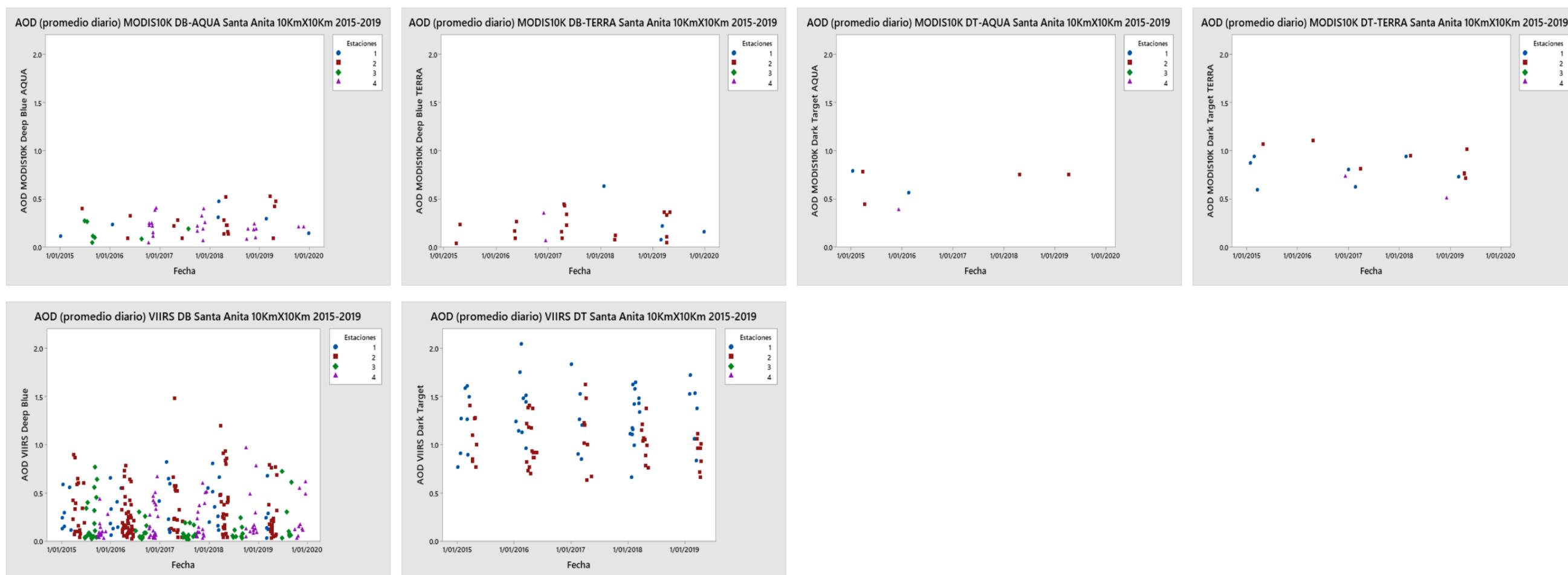


Figura N°61. Promedio de AOD medidos por instrumentos satelitales para la estación Santa Anita 2015-2019

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

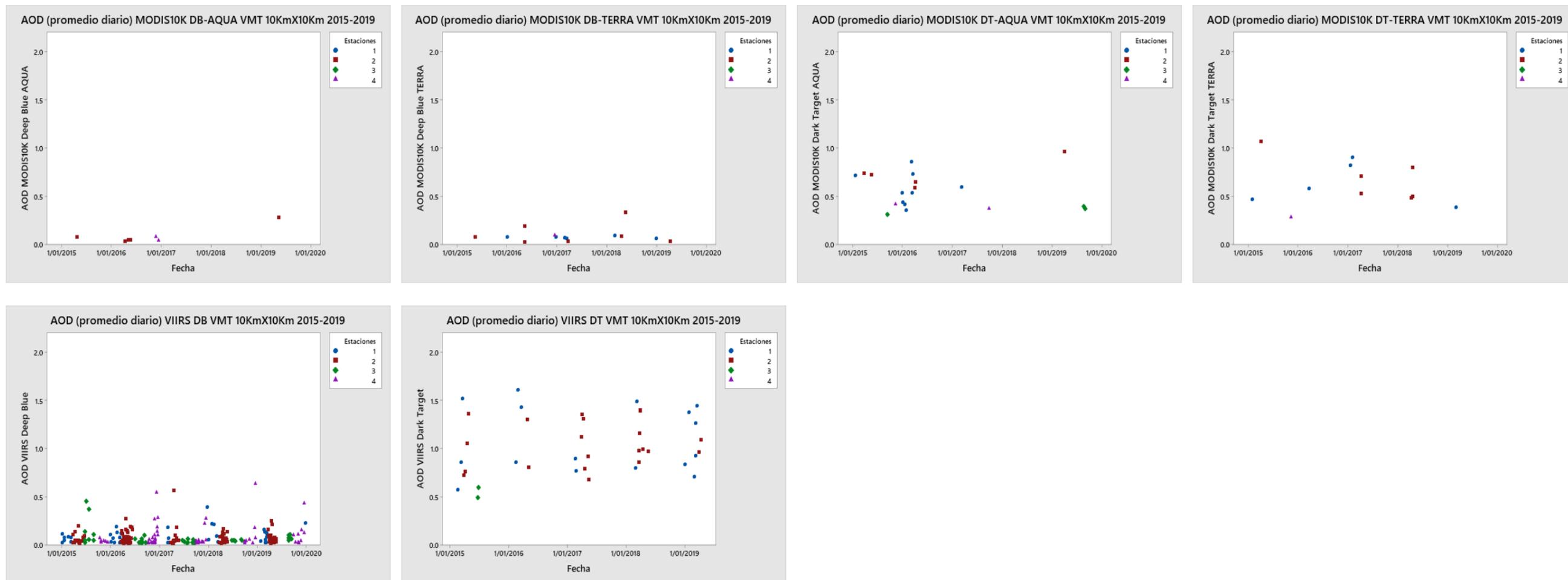


Figura N°62. Promedio de AOD medidos por instrumentos satelitales para la estación Villa el Salvador 2015-2019  
Fuente: (Elaboración propia, 2021)

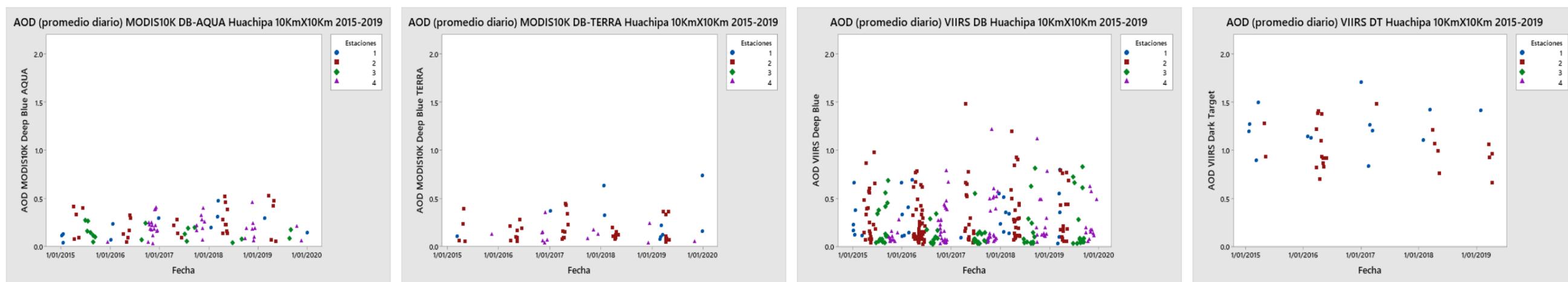


Figura N°63. Promedio de AOD medidos por instrumentos satelitales para la estación Huachipa 2015-2019  
Fuente: (Elaboración propia, 2021)

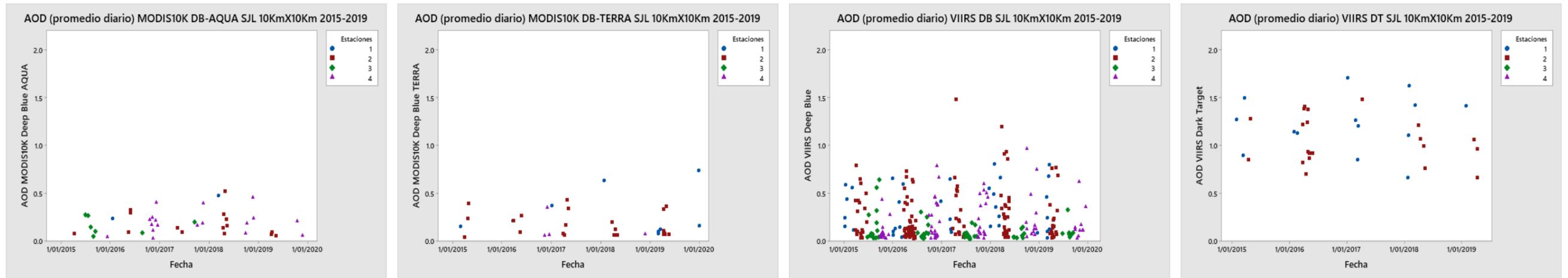


Figura N°64. Promedio de AOD medidos por instrumentos satelitales para la estación San Juan de Lurigancho 2015-2019  
Fuente: (Elaboración propia, 2021)

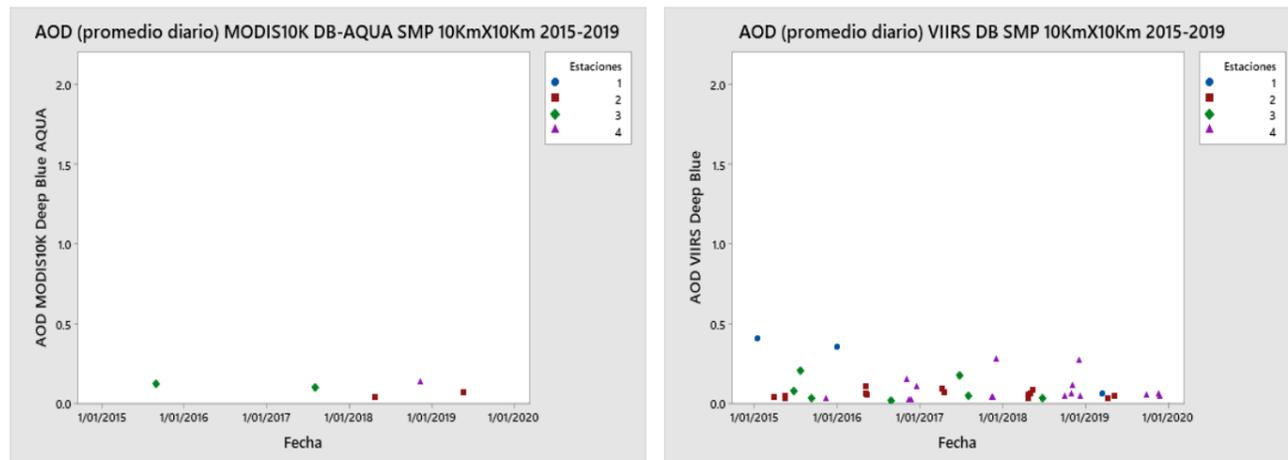


Figura N°65. Promedio de AOD medidos por instrumentos satelitales para la estación San Martín de Porres 2015-2019  
Fuente: (Elaboración propia, 2021)

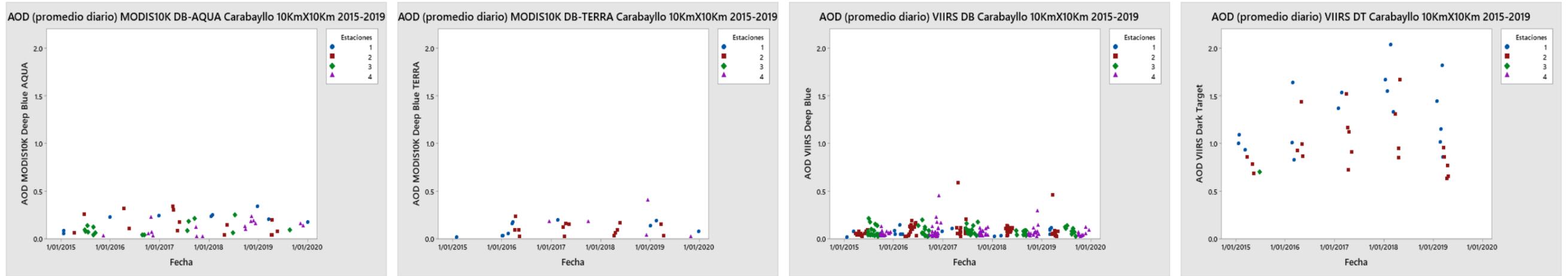


Figura N°66. Promedio de AOD medidos por instrumentos satelitales para la estación Carabayllo 2015-2019

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

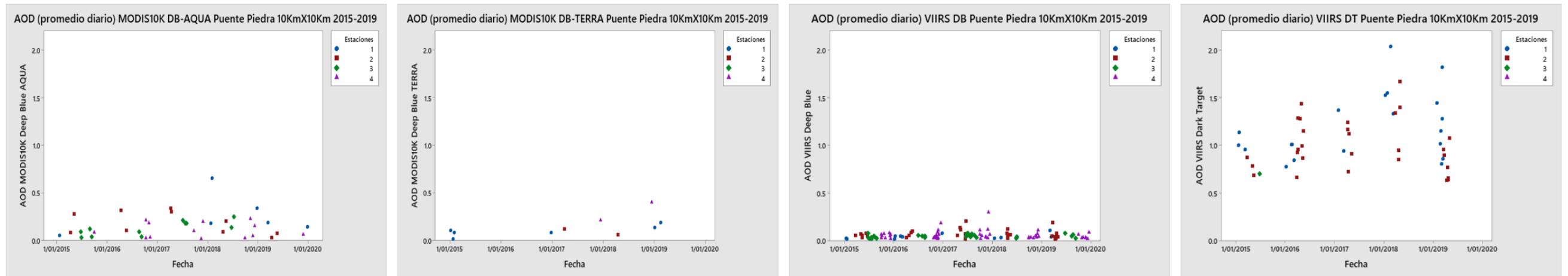


Figura N°67. Promedio de AOD medidos por instrumentos satelitales para la estación Puente Piedra 2015-2019

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

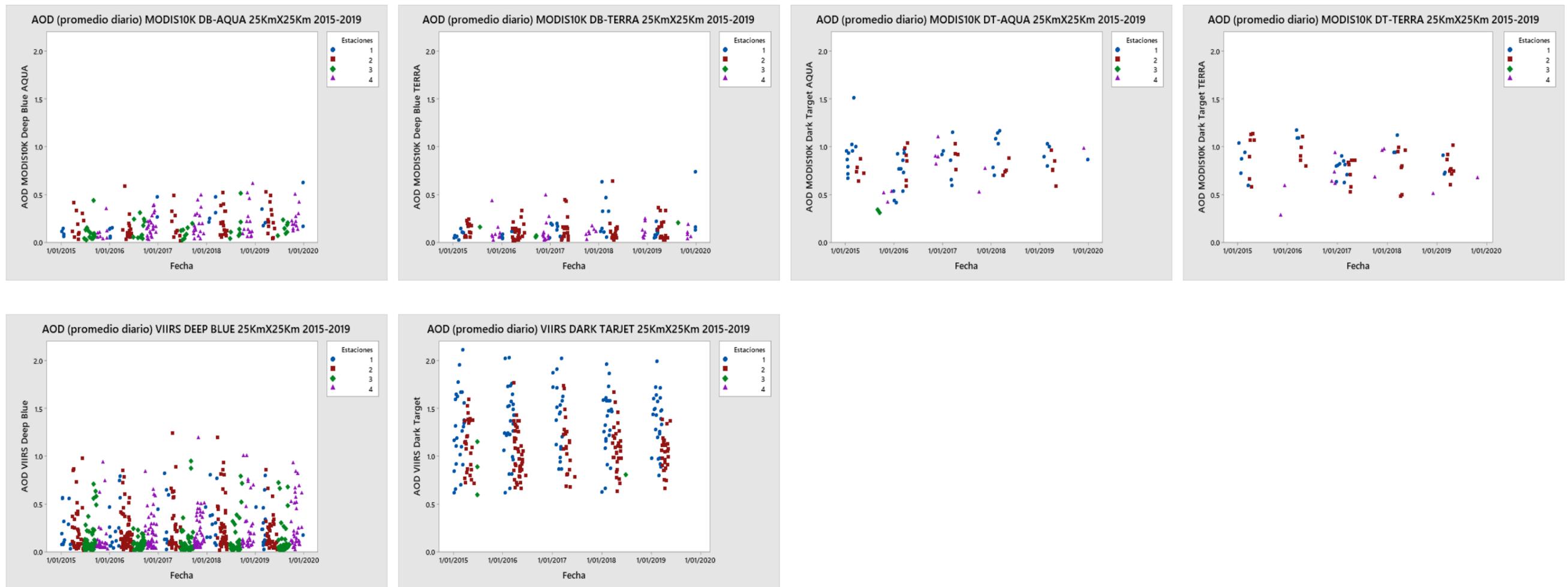


Figura N°68. Promedio de AOD medidos por instrumentos satelitales para el Dominio N°01 de 25kmx25km 2015-2019  
Fuente: (Elaboración propia, 2021)

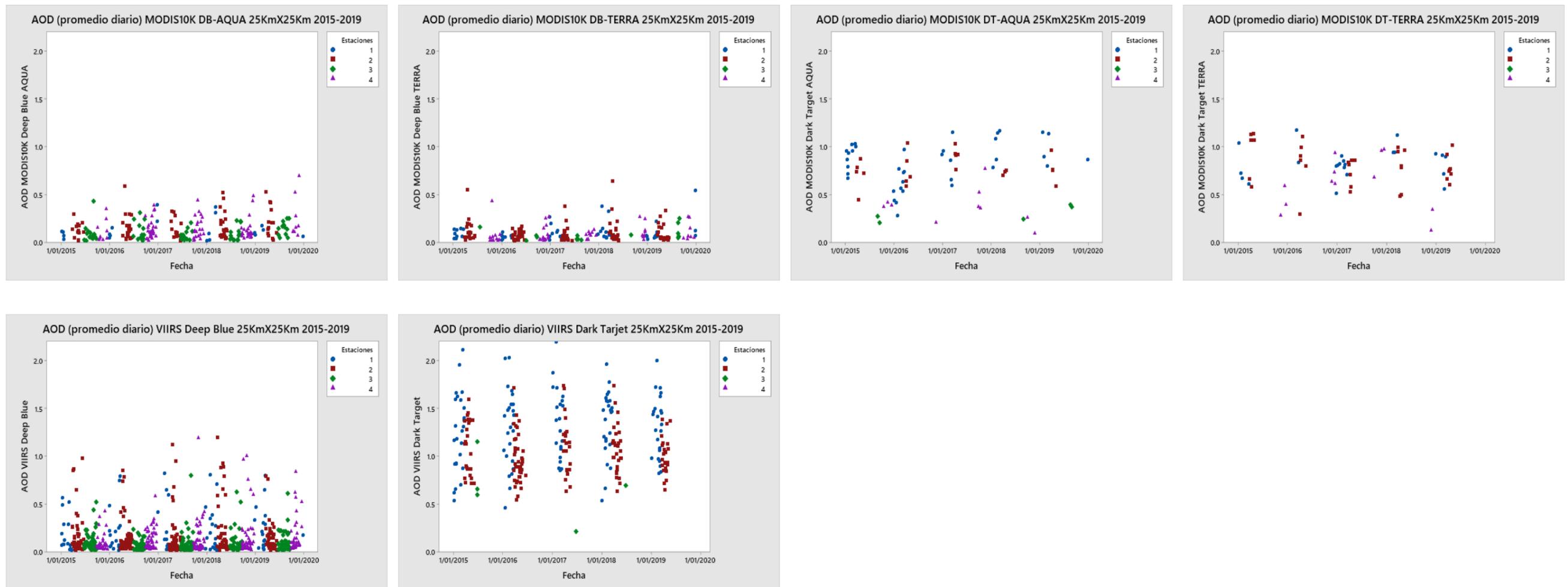


Figura N°69. Promedio de AOD medidos por instrumentos satelitales para el Dominio N°02 de 25kmx25km 2015-2019  
Fuente: (Elaboración propia, 2021)

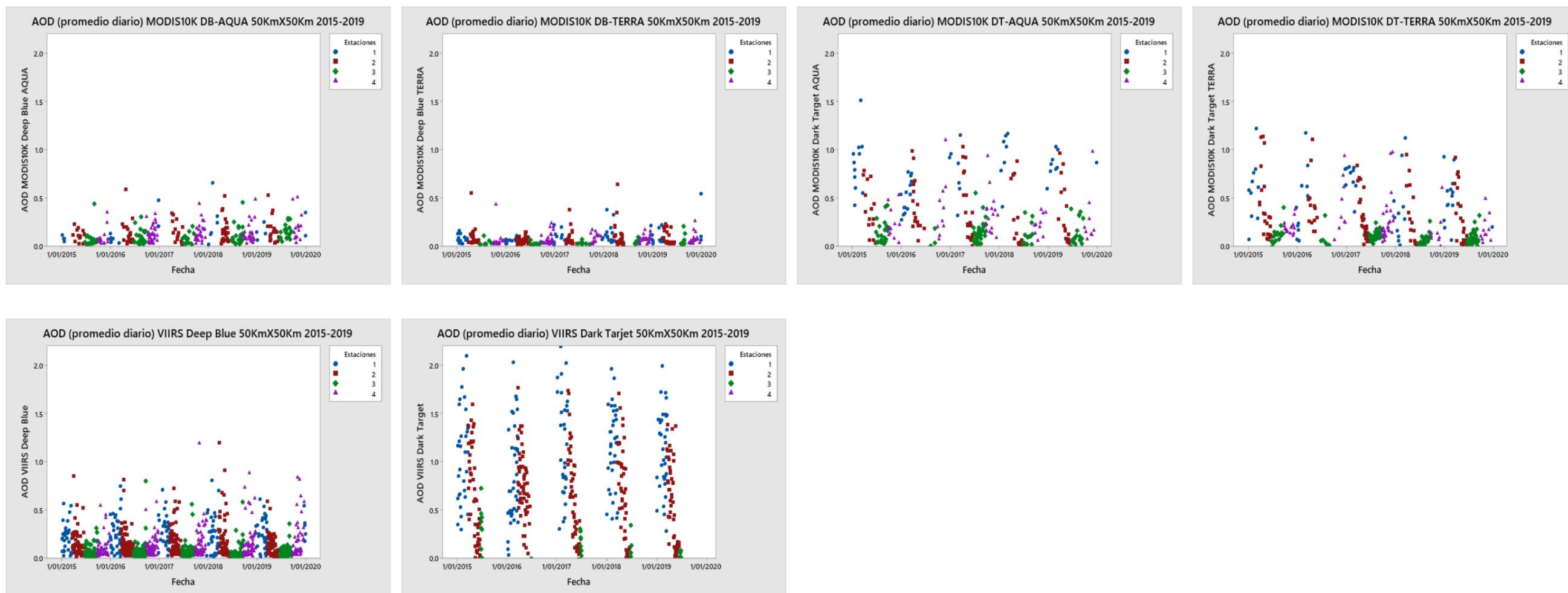


Figura N°70. Promedio de AOD medidos por instrumentos satelitales para el Dominio N°03 de 50kmx50km 2015-2019

Fuente: (Elaboración propia, 2021)

8.3. APÉNDICE A3: Representación espacial de información satelitales extraída de los satélites AQUA, TERRA y SUOMI NPP para los algoritmos Dark Target y Deep Blue para el periodo de 2015 - 2019.

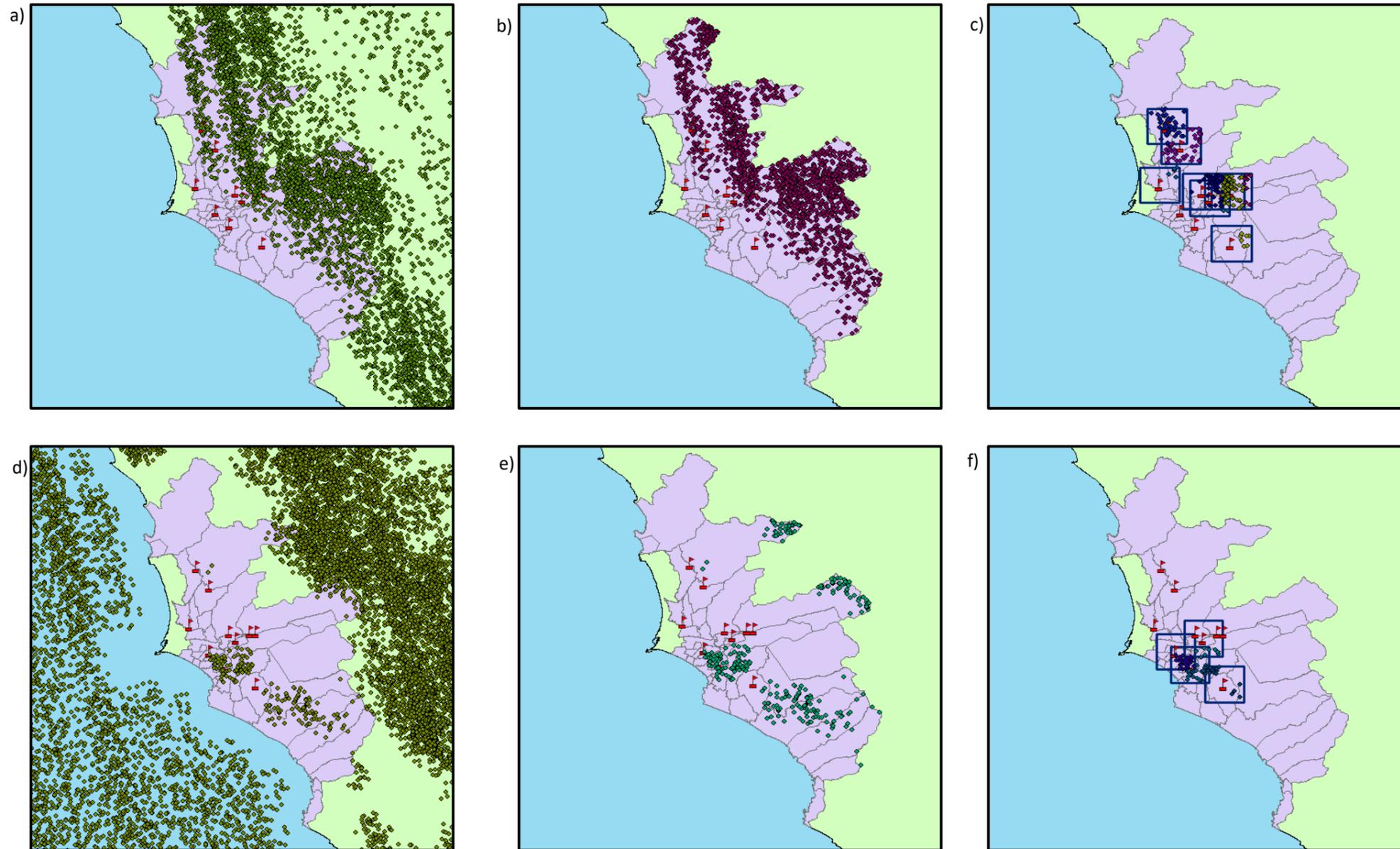


Figura N°71. Representación espacial de información extraída del satélite AQUA para el periodo 2015-2019: a) Total de datos para el algoritmo Deep Blue, b) Datos filtrados para la región Lima del algoritmo Deep Blue, c) Datos filtrados para las estaciones del SENAMHI del algoritmo Deep Blue, d) Total de datos para el algoritmo Dark Target, e) Datos filtrados para la región Lima del algoritmo Dark Target, f) Datos filtrados para las estaciones del SENAMHI del algoritmo Dark Target.  
Fuente: (Elaboración propia, 2021)

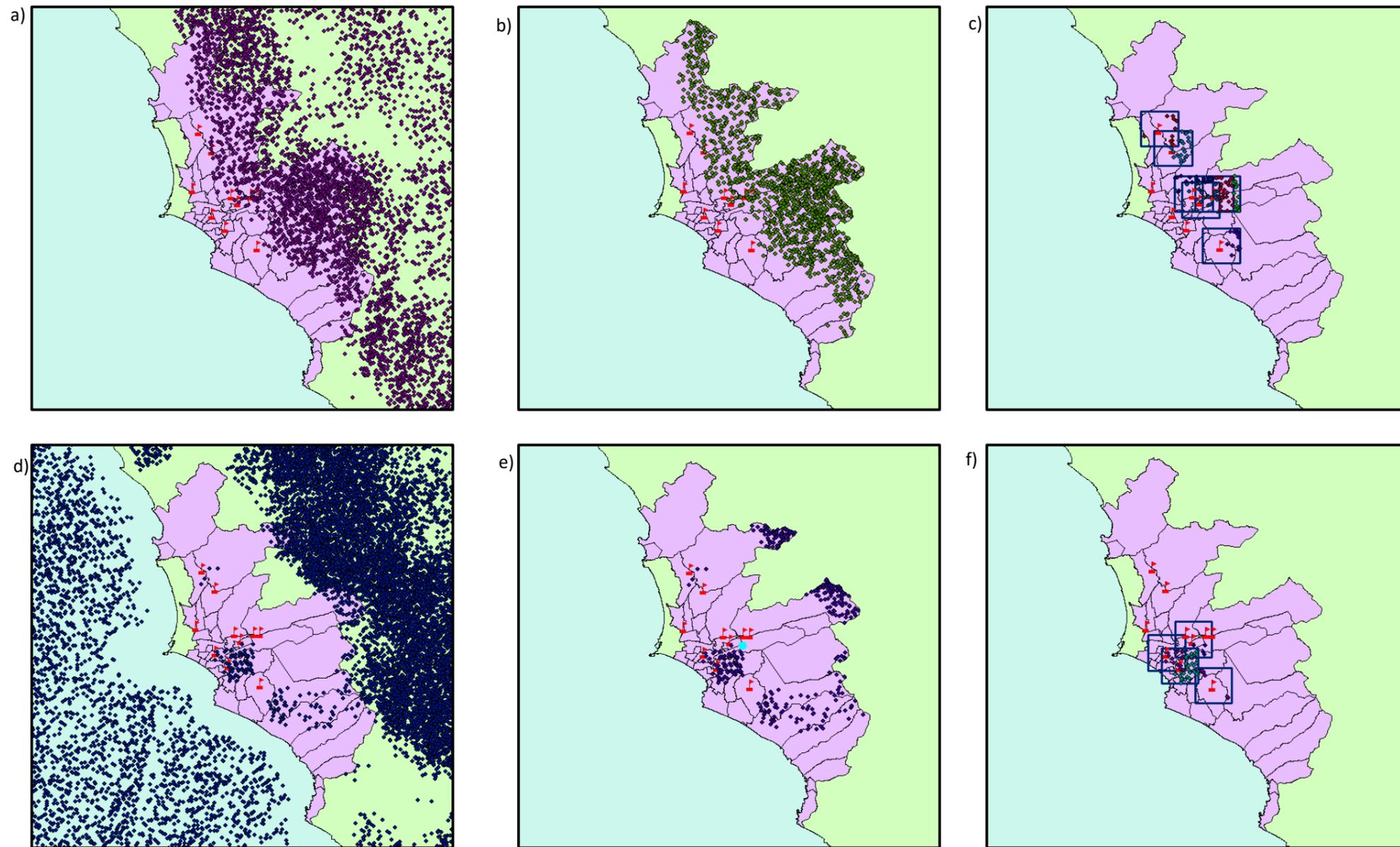


Figura N°72. Representación espacial de información extraída del satélite TERRA para el periodo 2015-2019: a) Total de datos para el algoritmo Deep Blue, b) Datos filtrados para la región Lima del algoritmo Deep Blue, c) Datos filtrados para las estaciones del SENAMHI del algoritmo Deep Blue, d) Total de datos para el algoritmo Dark Target, e) Datos filtrados para la región Lima del algoritmo Dark Target, f) Datos filtrados para las estaciones del SENAMHI del algoritmo Dark Target.  
 Fuente: (Elaboración propia, 2021)

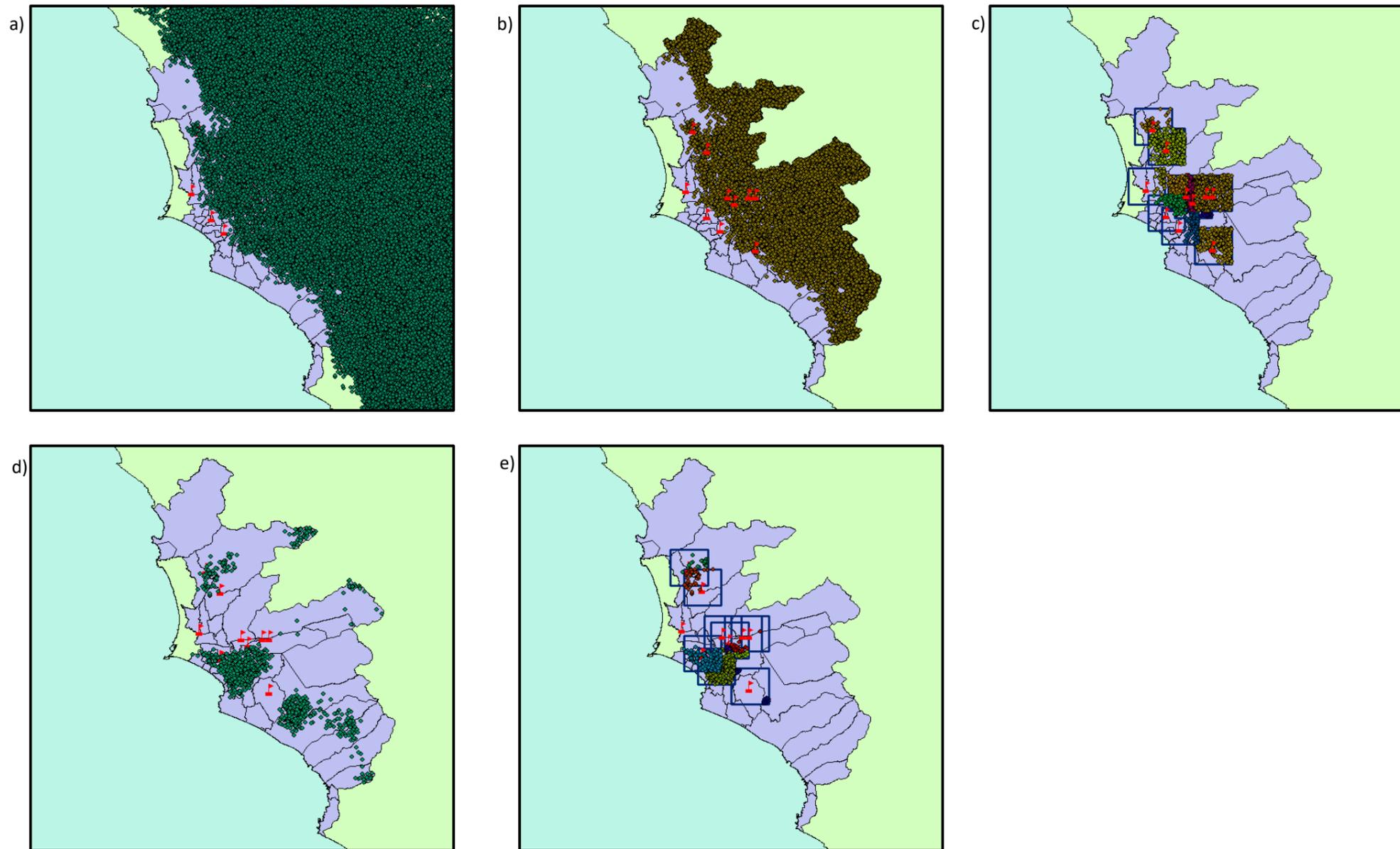


Figura N°73. Representación espacial de información extraída del satélite SUOMI NPP para el periodo 2015-2019: a) Total de datos para el algoritmo Deep Blue, b) Datos filtrados para la región Lima del algoritmo Deep Blue, c) Datos filtrados para las estaciones del SENAMHI del algoritmo Deep Blue, d) Datos filtrados para la región Lima del algoritmo Dark Target, e) Datos filtrados para las estaciones del SENAMHI del algoritmo Dark Target.

Fuente: (Elaboración propia, 2021)