

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“COMPARACIÓN ENTRE TRES MUESTREADORES DE  
MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>2.5</sub>), EN EL CAMPUS DE LA  
UNALM”**

Presentada por:

**GEORGE ALEXIS CASTELAR ULFE**

Tesis para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

**LIMA – PERÚ**

**2019**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA  
FACULTAD DE CIENCIAS**

**“COMPARACIÓN ENTRE TRES MUESTREADORES DE MATERIAL  
PARTICULADO (PM<sub>2.5</sub>), EN EL CAMPUS DE LA UNALM”**

Presentada por:

**George Alexis Castelar Ulfe**

Tesis para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

---

Ing. Franklin Delio Unsihuay Tovar  
PRESIDENTE

---

M. Sc. Armando Javier Aramayo Bazzetti  
MIEMBRO

---

Mg. Sc. Wilfredo Celestino Baldeón Quispe  
MIEMBRO

---

Ph. D. Sergio Artemio Pacsi Valdivia  
ASESOR

### ***DEDICATORIA***

El presente trabajo de investigación está dedicado a mi familia, a mis amigos y a todas las personas que me apoyaron y motivaron, incluyendo a aquellas que ya no están conmigo. Especialmente, quiero dedicar este logro a la persona que siempre creyó en mí y cuyo amor incondicional es mi razón de vida, gracias por todo mamá.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por siempre estar conmigo durante las duras pruebas que me ha tocado vivir.

A mis padres, cuyo esfuerzo y sacrificio nunca podré terminar de recompensar. Gracias por acompañarme en todas mis amanecidas y por sus palabras de aliento.

A mi mamita Gladys, mis tíos Fredy y James, mi tía Sonia, Kelly, Julito y mi madrina Yessica; mi querida familia, gracias por siempre creer en mí.

Al Ph. D. Sergio Pacsi Valdivia, cuyo apoyo, motivación y conocimientos fueron una guía en el desarrollo exitoso de este trabajo de investigación. Gracias por su paciencia, entusiasmo y amistad.

A los miembros del jurado, cuyos valiosos aportes enriquecieron el desarrollo de la presente tesis.

A la Universidad Nacional Agraria La Molina, por los conocimientos entregados y cuyo financiamiento, ayudó significativamente al inicio de la presente investigación.

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y al Laboratorio de Recursos Hídricos de la UNALM, por brindarme la data de las concentraciones de material particulado y las variables meteorológicas, respectivamente.

A mis amigos de la universidad, gracias a todos por sus consejos y apoyo incondicional, en las buenas y en las malas.

A mis compañeros de trabajo, de ayer y hoy, en especial a la señorita Teysa Cornejo, mi mentora y amiga, cuyos consejos y apoyo son una guía en mi camino.

Al señor Edgar Giraldo, encargado del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la UNALM, por su apoyo en tiempos de crisis y por su infinita paciencia.

A la señorita Karen Caman, mi compañera de tesis, gracias por tu ayuda en el desarrollo de esta investigación, sin ti no lo hubiera conseguido amiga.

A ti, gracias por tanto amor, por tu apoyo infinito, por las risas, por las palabras de motivación y por ser la luz en mis días grises.

# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	xii
<b>ABSTRACT</b> .....	xiii
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	5
2.1 Definición del material particulado atmosférico (PM) .....	5
2.2 Clasificación del material particulado atmosférico .....	6
2.3 Composición del material particulado fino (PM <sub>2,5</sub> ) .....	7
2.4 Clasificación de las fuentes del material particulado fino (PM <sub>2,5</sub> ) .....	8
2.5 Variables meteorológicas que afectan la concentración del PM <sub>2,5</sub> .....	10
2.6 Métodos de determinación de la concentración del material particulado fino (PM <sub>2,5</sub> ) atmosférico en suspensión .....	12
2.7 Evaluación comparativa de las metodologías de muestreo del PM <sub>2,5</sub> .....	14
2.7.1 Experiencia internacional .....	14
2.8 Estándares de calidad ambiental para aire .....	20
2.9 Índice de Calidad del Aire – INCA .....	21
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	24
3.1 Descripción del lugar .....	24
3.2 Materiales para el muestreo .....	25
3.3 Materiales de laboratorio .....	25
3.4 Materiales de gabinete .....	26
3.5 Equipos .....	26
3.6 Metodología .....	31

3.6.1	Determinación de la variación temporal del material particulado fino (PM <sub>2,5</sub> ) .....	31
3.6.2	Relación entre las concentraciones de PM <sub>2,5</sub> y las variables meteorológicas .....	42
3.6.3	Relación entre la metodología gravimétrica de alto volumen (Hivol – 3000) y la metodología gravimétrica de bajo volumen (Partisol 2000H), y determinación de ecuaciones de corrección .....	43
3.6.4	Relación entre la metodología gravimétrica de bajo volumen (Microvol – 1100) y la metodología gravimétrica de bajo volumen (Partisol 2000H), y determinación de ecuaciones de corrección .....	44
3.6.5	Análisis del costo económico para el muestreo del material particulado fino (PM <sub>2,5</sub> ) .....	45
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>46</b>
4.1	Variación temporal de la concentración de PM <sub>2,5</sub> en el aire .....	46
4.1.1	Comportamiento horario de la concentración de PM <sub>2,5</sub> en Lima Metropolitana .....	46
4.1.2	Comportamiento diario de la concentración de PM <sub>2,5</sub> .....	47
a.	Comportamiento diario de la concentración de PM <sub>2,5</sub> en Lima Este .....	48
b.	Comportamiento diario de la concentración de PM <sub>2,5</sub> en el área de estudio .....	50
4.1.3	Comportamiento mensual de la concentración de PM <sub>2,5</sub> .....	59
a.	Comportamiento mensual de la concentración de PM <sub>2,5</sub> en Lima Este ...	59
b.	Comportamiento mensual de la concentración de PM <sub>2,5</sub> en el área de estudio .....	62
4.2	Relación entre las concentraciones de PM <sub>2,5</sub> y las variables meteorológicas	66
4.2.1	Temperatura ambiental (°C) .....	68
4.2.2	Humedad relativa (%) .....	69
4.2.3	Velocidad y dirección del viento (m/s) .....	71
4.2.4	Radiación solar (W/m <sup>2</sup> ) .....	75

4.3	Relación entre la metodología gravimétrica de alto volumen (Hivol – 3000) y la metodología gravimétrica de bajo volumen (Partisol 2000H), y determinación de ecuaciones de corrección .....	76
4.4	Relación entre la metodología gravimétrica de bajo volumen (Microvol – 1100) y la metodología gravimétrica de bajo volumen (Partisol 2000H), y determinación de ecuaciones de corrección .....	85
4.5	Análisis del costo económico para el muestreo del material particulado fino (PM <sub>2,5</sub> ) .....	93
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>96</b>
5.1	Del análisis y evaluación horaria, diaria y mensual del PM <sub>2,5</sub> en Lima Este y el campus de la UNALM .....	96
5.2	Del análisis y evaluación de la relación entre la concentración del PM <sub>2,5</sub> con las variables meteorológicas en el área de estudio .....	96
5.3	Del análisis y evaluación de la ecuación de corrección para el PM <sub>2,5</sub> entre los muestreadores Hivol – 3000 y Partisol 2000H, en el área de estudio .....	97
5.4	Del análisis y evaluación de la ecuación de corrección para el PM <sub>2,5</sub> entre los muestreadores Microvol - 1100 y Partisol 2000H, en el área de estudio .....	97
5.5	Del análisis de costos económicos, para un muestreo del PM <sub>2,5</sub> utilizando los equipos del presente trabajo .....	98
<b>VI.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>99</b>
<b>VII.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>100</b>
<b>VIII.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>107</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b>	Valores estándares establecidos para $PM_{2,5}$ .....	21
<b>Tabla 2:</b>	Índice de Calidad Ambiental para $PM_{2,5}$ promedio 24 horas .....	21
<b>Tabla 3:</b>	Cuidados y recomendaciones del Índice de Calidad del Aire .....	23
<b>Tabla 4:</b>	Etapas de pre-muestreo $PM_{2,5}$ .....	34
<b>Tabla 5:</b>	Etapas de muestreo $PM_{2,5}$ .....	35
<b>Tabla 6:</b>	Etapas de post-muestreo $PM_{2,5}$ .....	35
<b>Tabla 7:</b>	Ubicación de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire .....	38
<b>Tabla 8:</b>	Estadísticos descriptivos de las concentraciones promedio de $PM_{2,5}$ obtenidas con los muestreadores Hivol – 3000, Microvol – 1100 y Partisol 2000H, para el periodo de muestreo .....	51
<b>Tabla 9:</b>	Resultados de la prueba estadística Anderson Darling aplicada a los grupos de datos de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidos en el muestreador Partisol 2000H, para diciembre 2018 – marzo 2019 .....	52
<b>Tabla 10:</b>	Valores p resultantes de la aplicación de las pruebas estadísticas homogeneidad de varianzas y t en dos muestras .....	52
<b>Tabla 11:</b>	Resultado de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo; para el muestreador Microvol – 1100 .....	55
<b>Tabla 12:</b>	Resultado de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo; para el muestreador Partisol 2000H .....	55
<b>Tabla 13:</b>	Resultado de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo; para el muestreador Hivol – 3000 .....	56



<b>Tabla 14:</b>	Resultado de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidos en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo; para los muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000 .....	63
<b>Tabla 15:</b>	Resultados de la prueba estadística de normalidad Anderson Darling para las variables meteorológicas: temperatura ambiental, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, durante el periodo de diciembre del 2018 a marzo del 2019 .....	67
<b>Tabla 16:</b>	Resultados de las pruebas estadísticas de correlación de Spearman y Pearson, entre variables meteorológicas y concentración de $PM_{2,5}$ en el área de estudio .....	67
<b>Tabla 17:</b>	Resultados de la prueba estadística Ryan Joiner aplicada a los grupos de datos de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidos con el Hivol – 3000 los mismos días monitoreados con el Partisol 2000H .....	77
<b>Tabla 18:</b>	Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Hivol – 3000 vs. Partisol 2000H, para el período de muestreo diciembre 2018 a febrero del 2019 .....	77
<b>Tabla 19:</b>	Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Hivol – 3000 vs. Partisol 2000H, para el mes de diciembre de 2018 .....	79
<b>Tabla 20:</b>	Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Hivol – 3000 vs. Partisol 2000H, para el mes de enero de 2019 .....	80
<b>Tabla 21:</b>	Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Hivol – 3000 vs. Partisol 2000H, para el mes de febrero de 2019 .....	81
<b>Tabla 22:</b>	Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Hivol – 3000 vs. Partisol 2000H, para el mes de marzo de 2019 .....	83
<b>Tabla 23:</b>	Concentraciones del Hivol – 3000 corregidas a partir de las ecuaciones de regresión halladas por la relación Hivol vs. Partisol .....	84
<b>Tabla 24:</b>	Diferencia entre la menor y mayor observación corregida entre los equipos Hivol - 3000 y Partisol 2000H .....	85
<b>Tabla 25:</b>	Resultados de la prueba estadística Ryan Joiner aplicada a los grupos de datos de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidos con el Microvol - 1100 los mismos días monitoreados con el Partisol 2000H .....	85

<b>Tabla 26:</b>	Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Microvol - 1100 vs. Partisol 2000H, para el período de muestreo enero del 2019 a marzo del 2019 .....	86
<b>Tabla 27:</b>	Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Microvol - 1100 vs. Partisol 2000H, para el mes de diciembre de 2018 .....	87
<b>Tabla 28:</b>	Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Microvol - 1100 vs. Partisol 2000H, para el mes de enero de 2019 .....	88
<b>Tabla 29:</b>	Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Microvol - 1100 vs. Partisol 2000H, para el mes de febrero de 2019 .....	89
<b>Tabla 30:</b>	Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Microvol - 1100 vs. Partisol 2000H, para el mes de marzo de 2019 .....	91
<b>Tabla 31:</b>	Concentraciones del Microvol - 1100 corregidas a partir de las ecuaciones de regresión halladas por la relación Hivol vs. Partisol .....	92
<b>Tabla 32:</b>	Diferencia entre la menor y mayor observación corregida entre los equipos Microvol – 1100 y Partisol 2000H .....	93
<b>Tabla 33:</b>	Características técnicas y económicas de los equipos Microvol – 1100, Partisol 2000i-BV y Hivol – 3000 .....	94
<b>Tabla 34:</b>	Características técnicas y económicas de los tipos de filtro utilizados en el presente trabajo de investigación .....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b>	Tamaño del material particulado respecto al cabello humano .....	5
<b>Figura 2:</b>	Emisiones de PM <sub>2,5</sub> por tipo de fuente en Lima y Callao (Ton/año - 2016) .....	9
<b>Figura 3:</b>	Emisiones de PM <sub>2,5</sub> por categoría vehicular el Lima y Callao (Ton/año - 2016) .....	10
<b>Figura 4:</b>	Ubicación de la zona de estudio dentro del campus de la UNALM ...	25
<b>Figura 5:</b>	Equipo muestreador de alto volumen – Hivol 3000 .....	27
<b>Figura 6:</b>	Equipo muestreador de bajo volumen – Partisol 2000H .....	28
<b>Figura 7:</b>	Equipo muestreador de bajo volumen – Microvol 1100 .....	29
<b>Figura 8:</b>	Desecador con filtros para material particulado .....	30
<b>Figura 9:</b>	Balanza analítica A&D – GH 200 .....	30
<b>Figura 10:</b>	Variación horaria del PM <sub>2,5</sub> en la Embajada de los Estados Unidos para el periodo diciembre 2018 a marzo 2019 .....	47
<b>Figura 11:</b>	Variación diaria de concentración del PM <sub>2,5</sub> en Lima Este para las estaciones de SENAMHI y la Embajada de los Estados Unidos, durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019 .....	48
<b>Figura 12:</b>	Variación diaria del Índice de Calidad del Aire (INCA) en Lima Este para las estaciones de SENAMHI y la Embajada de los Estados Unidos, durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019 .....	50
<b>Figura 13:</b>	Diagrama de caja de las concentraciones de PM <sub>2,5</sub> obtenidas con los tres equipos muestreadores: Hivol, Microvol y Partisol; considerando los datos validados, para el periodo de muestreo .....	53
<b>Figura 14:</b>	Variación diaria de la concentración del PM <sub>2,5</sub> en la zona de estudio utilizando los muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000; durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019 .....	57
<b>Figura 15:</b>	Variación diaria del Índice de Calidad del Aire (INCA) para PM <sub>2,5</sub> en la zona de estudio utilizando los muestreadores Microvol – 1100,	

	Partisol 2000H y Hivol – 3000; durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019, durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019 .....	58
<b>Figura 16:</b>	Variación mensual de concentración del PM <sub>2,5</sub> en Lima Este para las estaciones de SENAMHI y la Embajada de los Estados Unidos, durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019 .....	60
<b>Figura 17:</b>	Variación mensual del Índice de Calidad del Aire (INCA) para PM <sub>2,5</sub> en Lima Este para las estaciones de SENAMHI y la Embajada de los Estados Unidos, durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019 .....	61
<b>Figura 18:</b>	Variación mensual de la concentración del PM <sub>2,5</sub> en la zona de estudio utilizando los muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000; durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019 .....	64
<b>Figura 19:</b>	Variación mensual del Índice de Calidad del Aire (INCA) para PM <sub>2,5</sub> en la zona de estudio utilizando los muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000; durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019, durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019 .....	65
<b>Figura 20:</b>	Variación horaria de la temperatura del aire promedio para los meses de diciembre de 2018 a marzo de 2019 .....	68
<b>Figura 21:</b>	Variación mensual de la concentración de PM <sub>2,5</sub> utilizando los equipos Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000, y su relación con la temperatura promedio .....	69
<b>Figura 22:</b>	Variación horaria de la humedad relativa promedio para los meses de diciembre de 2018 a marzo de 2019 .....	70
<b>Figura 23:</b>	Variación mensual de la concentración de PM <sub>2,5</sub> utilizando los equipos Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000, y su relación con la humedad relativa .....	71
<b>Figura 24:</b>	Variación horaria de la velocidad del viento promedio para los meses de diciembre de 2018 a marzo de 2019 .....	72
<b>Figura 25:</b>	Variación mensual de la concentración de PM <sub>2,5</sub> utilizando los equipos Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000, y su relación con la velocidad de viento .....	72

<b>Figura 26:</b>	Representación gráfica de la dirección predominante del viento durante el periodo de monitoreo respecto de la ubicación del campus de la UNALM .....	73
<b>Figura 27:</b>	Variación mensual de la dirección de viento promedio para el periodo de (a) diciembre de 2018 a marzo de 2019, (b) diciembre de 2018, (c) enero de 2019, (d) febrero de 2019 y (e) marzo de 2019 .....	74
<b>Figura 28:</b>	Variación horaria de la radiación solar promedio para los meses de diciembre de 2018 a marzo de 2019 .....	75
<b>Figura 29:</b>	Variación mensual de la concentración de PM <sub>2,5</sub> utilizando los equipos Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000, y su relación con la radiación solar .....	76
<b>Figura 30:</b>	Relación entre las concentraciones de PM <sub>2,5</sub> obtenidas con el Hivol – 3000 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el periodo de diciembre del 2018 a febrero del 2019 .....	78
<b>Figura 31:</b>	Relación entre las concentraciones de PM <sub>2,5</sub> obtenidas con el Hivol – 3000 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el mes de diciembre de 2018 .....	79
<b>Figura 32:</b>	Relación entre las concentraciones de PM <sub>2,5</sub> obtenidas con el Hivol – 3000 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el mes de enero de 2019 .....	81
<b>Figura 33:</b>	Relación entre las concentraciones de PM <sub>2,5</sub> obtenidas con el Hivol – 3000 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el mes de febrero de 2019 .....	82
<b>Figura 34:</b>	Relación entre las concentraciones de PM <sub>2,5</sub> obtenidas con el Microvol - 1100 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el periodo de enero del 2019 a marzo del 2019 .....	86
<b>Figura 35:</b>	Relación entre las concentraciones de PM <sub>2,5</sub> obtenidas con el Microvol - 1100 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el mes de enero de 2019 .....	89
<b>Figura 36:</b>	Relación entre las concentraciones de PM <sub>2,5</sub> obtenidas con el Microvol - 1100 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el mes de febrero de 2019 .....	90

**Figura 37:** Relación entre las concentraciones de  $PM_{2.5}$  obtenidas con el Microvol - 1100 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el mes de marzo de 2019 ..... 92

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1:</b>	Frecuencia y cronograma de monitoreo .....	107
<b>Anexo 2:</b>	Cadena de custodia .....	108
<b>Anexo 3:</b>	Concentraciones de PM <sub>2,5</sub> obtenidas con los muestreadores Hivol – 3000, Microvol – 1100 y Partisol 2000H .....	109
<b>Anexo 4:</b>	Cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para la sección “Evaluación del nivel de igualdad o diferencia entre los grupos de concentración para el muestreador Partisol 2000H” .....	110
<b>Anexo 5:</b>	Cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para la sección “Comportamiento de la concentración de PM <sub>2,5</sub> en relación a los días de la semana” .....	113
<b>Anexo 6:</b>	Cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para la sección “Comportamiento de la concentración de PM <sub>2,5</sub> en relación a los meses de muestreo” .....	121
<b>Anexo 7:</b>	Cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para la sección “Relación entre las concentraciones de PM <sub>2,5</sub> y las variables meteorológicas: temperatura ambiental, humedad relativa, velocidad del viento, precipitación y radiación solar” .....	124
<b>Anexo 8:</b>	Cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para la sección “Relación entre la metodología gravimétrica de alto volumen (Hivol – 3000) y la metodología gravimétrica de bajo volumen (Partisol 2000H) y determinación de ecuaciones de corrección” .....	128
<b>Anexo 9:</b>	Cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para la sección “Relación entre la metodología gravimétrica de bajo volumen (Microvol – 1100) y la metodología gravimétrica de bajo volumen (Partisol 2000H) y determinación de ecuaciones de corrección” .....	132
<b>Anexo 10:</b>	Cotizaciones económicas .....	136
<b>Anexo 11:</b>	Certificados de calibración de los muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000 .....	140
<b>Anexo 12:</b>	Registro fotográfico .....	143

## RESUMEN

El presente estudio realizó una comparación entre tres equipos muestreadores de PM<sub>2,5</sub> utilizando la metodología de referencia para el muestreo del material particulado atmosférico fino (PM<sub>2,5</sub>) en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), distrito de La Molina. Para lograr un adecuado análisis se muestreó dicho contaminante durante un intervalo de cuatro meses (diciembre de 2018 a marzo de 2019), utilizando los equipos: Hivol - 3000, Partisol 2000H y Microvol - 1100, los mismos que se ubicaron en la azotea del Laboratorio de Ingeniería Ambiental; asimismo, se utilizaron datos de la estación meteorológica del Laboratorio de Recursos Hídricos. Por otro lado, se utilizaron datos de concentración de PM<sub>2,5</sub> y variables meteorológicas medidos y analizados por SENAMHI y la Embajada de los Estados Unidos. En base a la información proporcionada, se obtuvieron series de tiempo para analizar su comportamiento y tendencia en la zona este de Lima Metropolitana, a nivel horario, diario y mensual para el periodo de muestreo. Los datos de concentración de PM<sub>2,5</sub> obtenidos con los distintos equipos de muestreo fueron comparados utilizando el modelo de regresión lineal simple. A partir de las comparaciones realizadas y validadas se obtuvieron las ecuaciones de corrección:  $PARTISOL = -4,947 + 0,8195 \times HIVOL$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) con un  $r^2 = 0,764$  (válida para el rango de concentración entre 25,43  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 54,95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y  $PARTISOL = 8,853 + 0,9758 \times MICROVOL$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) con un  $r^2 = 0,735$  (válida para el rango de concentración entre 12,52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 30,87  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para el periodo total de muestreo. De la influencia de las variables meteorológicas sobre el PM<sub>2,5</sub> se determinó una relación negativa baja respecto a las variables temperatura ambiental, velocidad del viento y radiación solar; por otro lado, se determinó una relación positiva baja con la humedad relativa. Finalmente, se determinó que la adquisición de los equipos Microvol – 1100 y Hivol - 3000 y los filtros empleados para su uso (fibra de cuarzo y fibra de vidrio, respectivamente), representan una menor inversión económica respecto al método de referencia.

Palabras clave: equipos muestreadores, PM<sub>2,5</sub>, variables meteorológicas, regresión lineal simple.



## ABSTRACT

The present study made a comparison between three sampling teams of PM<sub>2.5</sub> using the reference methodology for the sampling of fine atmospheric particulate material (PM<sub>2.5</sub>) on the campus of the National Agrarian University La Molina (UNALM), district of La Molina. To achieve an adequate analysis, this contaminant was sampled over a four-month interval (December 2018 to March 2019), using the equipment: Hivol - 3000, Partisol 2000H and Microvol - 1100, the same that were located on the roof of the Laboratory of Environmental Engineering; likewise, data from the meteorological station of the Water Resources Laboratory were used. On the other hand, PM<sub>2.5</sub> concentration data and meteorological variables measured and analyzed by SENAMHI and the United States Embassy were used. Based on the information provided, time series were obtained to analyze their behavior and tendency in the eastern part of Metropolitan Lima, at the hourly, daily and monthly level for the sampling period. The PM<sub>2.5</sub> concentration data obtained with the different sampling equipment were compared using the simple linear regression model. From the comparisons made and validated, the correction equations were obtained:  $PARTISOL = -4,947 + 0,8195 \times HIVOL$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) with a  $r^2 = 0,764$  (valid for the concentration range between  $25,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$  to  $54,95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and  $PARTISOL = 8,853 + 0,9758 \times MICROVOL$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) with a  $r^2 = 0,735$  (valid for the concentration range between  $12,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$  to  $30,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) for the total period of sampling. From the influence of the meteorological variables on the PM<sub>2.5</sub> a low negative relationship was determined with respect to the variables environmental temperature, wind speed and solar radiation; on the other hand, a low positive relationship with relative humidity was determined. Finally, it was determined that the acquisition of the Microvol - 1100 and Hivol - 3000 equipment and the filters used for its use (quartz fiber and glass fiber, respectively), represent a lower economic investment with respect to the reference method.

Keywords: sampling equipment, PM<sub>2.5</sub>, meteorological variables, simple linear regression.

## I. INTRODUCCIÓN

Según nuestra constitución política se reconoce “el derecho de toda persona a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida” (Artículo 2º, inciso 22); asimismo, existen protocolos internacionales que defienden este derecho fundamental que todos tenemos, a vivir en un medio ambiente sano, como por ejemplo lo plantea el Pacto de San Salvador en su Artículo 11º, inciso 1 y 2. En este contexto, la Corte Interamericana de Derechos Humanos ha dejado muy en claro que al no conservar ni proteger el ambiente, se desprenden una serie de impactos que afectan directamente al ser humano, lo que a su vez va en contra con lo mencionado anteriormente. El Perú dentro de un marco de protección ambiental aprobó en 2005 la Ley General del Ambiente, mediante Ley N° 28611, donde se establecen los principios y normas básicas para “asegurar un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida” (Título I, capítulo I, artículo 1º) y así prevenir, mitigar y controlar la contaminación en cada uno de sus compartimientos ambientales.

La Asociación Americana para Ensayo y Materiales (ASTM) define a la contaminación atmosférica como la presencia en la atmósfera de sustancias no deseables, en concentraciones, tiempo y circunstancias tales que pueden afectar significativamente el confort, la salud y el bienestar de las personas o el uso y disfrute de sus propiedades. El aire limpio está considerado como un requisito básico para la salud y el bienestar, siendo incluido por las Naciones Unidas como uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2016).

El crecimiento demográfico y el incremento de las actividades industriales son parte del problema ambiental global. Más de la mitad de la población mundial vive en ciudades con índices de contaminación ambiental 2,5 veces mayores de lo establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Dicha organización publicó en 2016, un estudio global con estimaciones de mortalidad atribuible a la contaminación del aire. En el caso de Perú, se estimaron que para el año 2012 es posible atribuir 4239 muertes por contaminación del aire

Entre los contaminantes del aire que requieren mediciones confiables para poder evaluar los efectos en la calidad del aire y la salud humana destacan las partículas, llamadas también como partículas suspendidas, aeropartículas, aerosoles o material particulado (PM por sus siglas en inglés). Su importancia ha sido extensamente estudiada en diversos estudios epidemiológicos, la cual se ha asociado directamente con efectos adversos en la salud (Chow *et al.*, Dockery y Pope III, USEPA, Vedal, Watson *et al.*; citados por Chow *et al.*, 2016); llegando a ser clasificado como carcinogénico para los seres humanos, tanto en ambientes interiores y exteriores, por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) en el año 2013 (Loomis *et al.*; citado por Chow *et al.*, 2016). El material particulado menor de  $2,5\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ) es particularmente estudiado debido a su alta capacidad de penetración a las vías respiratorias (bronquios, bronquiolos y alveolos pulmonares) causando estrés oxidativo; problemas neurológicos y cardiovasculares (Oberdörster *et al.*, Azzi *et al.* y Rafael *et al.*; citados por Amaral *et al.*, 2015); por otro lado largas exposiciones a material particulado conlleva a un aumento en la tasa de mortalidad (Laden *et al.*, Peters *et al.* y Brook *et al.*; citados por Amaral *et al.*, 2015); siendo la población más susceptible aquellos con problemas cardiacos, personas mayores, diabéticos, embarazadas y aquellos con enfermedades pulmonares.

En cifras, la USEPA estima que un incremento de  $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{2,5}$  está asociado significativamente con un incremento en el riesgo de muerte por problemas cardiopulmonares y muerte en las poblaciones más susceptibles (Caussin *et al.*, 2012). Frampton y Utell (2000) señalan que en las ciudades la concentración de dicho contaminante varía entre 5000 a 10000 partículas/ $\text{cm}^3$ , incrementándose hasta 1000000 partículas/ $\text{cm}^3$  en horas con alto tránsito vehicular.

A menudo estas partículas modifican la dinámica de los procesos atmosféricos, estudios como los realizados por Chantara *et al.* (2014) y Shaughnessy *et al.* (2015), señalan que este contaminante juega un rol importante en la formación de nubes y la precipitación. Entre otros aspectos, se incluyen un forzamiento radiactivo a través de la reflexión y la absorción de la radiación solar e infrarroja (desbalance térmico global) (Jiao *et al.*, 2007); reducción en la visibilidad, eutrofización, acidificación de ecosistemas acuáticos, deterioro y decoloración de materiales de construcción (IPCC; citado por Ainhoa *et al.*, 2006).

Actualmente, la determinación de la concentración de  $\text{PM}_{2,5}$  se realiza utilizando la metodología internacional de la USEPA (2006) detallada en el Código Federal de

Regulaciones: Título 40, Parte 50 Apéndice L (40 CFR 50): Método de referencia para la determinación de material particulado fino como  $PM_{2,5}$  en la atmósfera. Asimismo, esta agencia posee una lista de muestreadores equivalentes y de referencia designados para medir distintos contaminantes aéreos, la última versión (actualizada el 1 de agosto de 2019) incluye al equipo “Partisol – Plus Model 2000 Sequential Air Sampler” de Rupprecht & Patashnick para el método de referencia de esta metodología

En el Perú, hasta finales de 2017, se empleó la norma de la USEPA; sin embargo, a través de Instituto Nacional de Calidad (INACAL), se publicó la Norma Técnica Peruana NTP 900.069.2017: Método de referencia para la determinación de material particulado fino como  $PM_{2,5}$  en la atmósfera. Esta nueva norma técnica es rigurosa en varios aspectos como por ejemplo el flujo de aire a utilizar por el muestreador (el cual podía ser de alto o bajo volumen, ahora se fija el valor de 16,67 l/min).

Mediciones de  $PM_{2,5}$ , usando el método gravimétrico toman un promedio mayor al de ocho horas no muestran un comportamiento temporal a corto plazo; sin embargo, métodos equivalentes que permiten concentraciones promedio de diez segundos, como el uso de la dispersión de la luz, son sensibles a la composición, distribución y forma de las partículas (Hinds; citado por Davis *et al.*, 2011), como resultado se obtienen concentraciones poco coherentes respecto al método de referencia, por lo que es vital aspectos como: la incertidumbre, precisión, exactitud y una base estadística sólida. Esto se puede lograr comparando métodos de referencia con métodos equivalentes, como lo detalla Macintosh et L. (2002) en su estudio.

El presente trabajo utilizó el método de separación inercial/filtración (gravimetría) desarrollado en la NTP 900.069.2017, para determinar la concentración del material particulado ( $PM_{2,5}$ ); y la Guía de los Estados miembros sobre las medidas de  $PM_{10}$  e intercomparación con el método de referencia, para la comparación de dos equipos de medición de  $PM_{2,5}$  frente al equipo Partisol, como método de referencia según la USEPA (RFPS-0498-117), para determinar ecuaciones de corrección y así poder utilizar, dos equipos de campo que no figuran ni como referencia ni como equivalente en la lista de la USEPA. Asimismo, se analizó la distribución temporal del material particulado ( $PM_{2,5}$ ) y su relación con diferentes variables meteorológicas en el campus de la UNALM.

El presente trabajo de investigación tiene un objetivo principal y cinco objetivos específicos, como se describe a continuación:

### **Objetivo principal**

Analizar la correlación entre tres equipos muestreadores de material particulado atmosférico ( $PM_{2,5}$ ) en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina para el periodo de diciembre de 2018 a marzo de 2019.

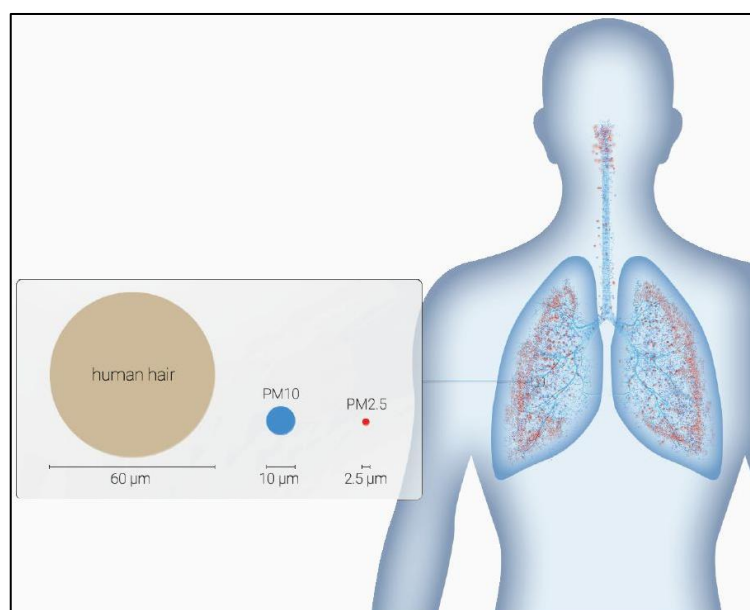
### **Objetivos específicos**

- Analizar y evaluar la variación horaria, diaria y mensual del material particulado ( $PM_{2,5}$ ) en el área de estudio.
- Determinar y evaluar la relación entre las concentraciones de material particulado ( $PM_{2,5}$ ) con las variables meteorológicas.
- Determinar la ecuación de corrección para el  $PM_{2,5}$  entre los muestreadores Hivol 3000 y Partisol 2000H en el área de estudio.
- Determinar la ecuación de corrección para el  $PM_{2,5}$  entre los muestreadores Microvol 1100 y Partisol 2000H en el área de estudio.
- Realizar un análisis de costos económicos, para un muestreo del  $PM_{2,5}$ , utilizando los equipos muestreadores del presente trabajo.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Definición de material particulado atmosférico (PM)

Se entiende como material particulado atmosférico (PM por sus siglas en inglés) a una mezcla de partículas sólidas y/o líquidas (excepto el agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera, las cuales varían en tamaño, forma, área superficial, composición química, solubilidad y origen (Dockery y Pope III, 2006). Algunas de estas partículas son lo suficientemente grandes u oscuras como para ser vistas por el ojo humano como los granos de arena, partículas de hollín o el humo del cigarro, otras no, por lo que es necesario el uso de un soporte técnico como un microscopio electrónico. Asimismo las pruebas epidemiológicas evidencian efectos adversos en la salud debido a una exposición prolongada del material particulado, esto debido a su tamaño; mientras menor sea su diámetro mayor será su daño sobre la salud, se precisó que las partículas finas ( $PM_{2.5}$ ) pueden penetrar el sistema respiratorio hasta los alveolos pulmonares, atravesando su pared celular directamente hasta el torrente sanguíneo (Ministerio del medio ambiente, 2016).



**Figura 1. Tamaño del material particulado respecto al cabello humano**

FUENTE: IQAir AirVisual, 2018

## 2.2 Clasificación del material particulado atmosférico

Debido a que estas partículas varían en tamaño, composición y forma es conveniente clasificarlas en función a un criterio o conjunto de criterios.

Para fines regulatorios e investigación relacionadas a la salud de las personas, se caracteriza el tamaño de las partículas en base a su diámetro aerodinámico (diámetro de una esfera uniforme de densidad unitaria con la misma velocidad de sedimentación terminal que la partícula de interés) (Gao, 2015):

- a. Partículas Totales en Suspensión (PTS): Son todas aquellas partículas con un diámetro aerodinámico menores a  $45\ \mu\text{m}$  (Bell, 2004).
- b. Partículas gruesas: La fracción gruesa incluye a las partículas con diámetro aerodinámico menor a  $10\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ).
- c. Partículas finas: La fracción fina incluye a las partículas con diámetro aerodinámico menor a  $2,5\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ).
- d. Partículas ultrafinas: La fracción ultrafina incluye a las partículas con diámetro aerodinámico menor a  $0,1\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{0,1}$ ).

Cabe mencionar que estas partículas se agrupan en rangos de tamaño, denominados “modas”, que están relacionadas con su proceso de formación y tamaño (Warneck; citado por Orozco y Quijano, 2005):

- a. Nucleación: Partículas con un diámetro menor a  $0,1\ \mu\text{m}$ , las cuales provienen principalmente de la condensación de vapores.
- b. Acumulación: Partículas con un diámetro mayor a  $0,1\ \mu\text{m}$  y menor a  $1$  o  $2\ \mu\text{m}$ , estas se originan debido al crecimiento de partículas de la moda de nucleación principalmente por reacciones que ocurren en las gotas de lluvia.
- c. Moda gruesa: Partículas con un diámetro mayor a  $1$  o  $3\ \mu\text{m}$ , estas se forman por procesos mecánicos como la erosión, se caracterizan por tener una masa elevada.

Asimismo, según el origen de la partícula se puede clasificar como:

- a. Partículas primarias: Se entiende por aquellas que son emitidas como tales a la atmósfera directamente de la fuente de emisión.
- b. Partículas secundarias: Se entiende por aquellas generadas por medio de reacciones químicas, por ejemplo interacciones entre gases precursores para formar partículas

por condensación, o entre una partícula y un gas para formar un aerosol por coagulación (Warneck; citado por Quijano, 2005).

### 2.3 Composición del material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>)

Debido a que existen diferentes fuentes de emisiones y mecanismos de formación, se puede afirmar que las partículas finas varían en su composición, llegando a ser una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos, la cual está condicionada por la composición de los gases que las rodean (Ainhoa, 2006). Suh y Wilson (1997) señalan que estas partículas se componen principalmente por los siguientes precursores:

- a. Sulfatos: Se originan por la oxidación del dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), el que a su vez se origina por la combustión de combustibles que contienen alto porcentaje de azufre. De manera natural puede estar presente como un componente primario en la sal marina o el yeso.
- b. Nitratos: Se presenta principalmente como nitrato de amonio (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>), el cual se deriva de la neutralización de vapores del ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) por amoníaco (NH<sub>3</sub>).
- c. Amonio: Forman parte del PM<sub>2,5</sub> bajo la forma de sulfato de amonio ((NH<sub>4</sub>) SO<sub>4</sub>) y nitrato de amonio (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>).
- d. Sodio y Cloro: Se encuentran en la sal marina, en zonas costeras.
- e. Carbón elemental: Formado por hollín durante la combustión de biomasa y combustibles fósiles.
- f. Carbón orgánico: Presente en los compuestos orgánicos; sus fuentes pueden ser móviles o industriales como también de la oxidación de COVs (compuestos orgánicos volátiles).
- g. Componentes minerales: Se originan por meteorización del suelo, actividades de la construcción y demolición, se tiene por ejemplo aluminio, sílice, hierro y calcio.
- h. Agua ligada a las partículas: Se forman debido a la capacidad de las sales de absorber agua de la atmósfera y convertirse en gotas líquidas.
- i. Bacterias y virus: Forman parte de las llamadas partículas biológicas inhalables, junto con los hongos, polen y desechos celulares. Estos compuestos causan severas alergias en las personas y contribuyen en un 25 por ciento al material particulado. (Jaenicke, citado por Cao *et al.*, 2014)



- j. Elementos traza: Se tienen por ejemplo metales como: titanio, vanadio, plomo, cadmio, mercurio, níquel, cromo, zinc y manganeso, procedente de procesos industriales.
- k. Compuestos orgánicos traza: Se tiene por ejemplo los HAPs (hidrocarburos aromáticos policíclicos) y alifáticos, alcoholes, fenoles, quinonas, dioxinas, aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos, etc. Los más abundantes son los ácidos e hidrocarburos alifáticos, sin embargo los más estudiados son los HAPs debido a sus propiedades nocivas (García *et al.*, 2013).

Cabe mencionar que los compuestos orgánicos traza pueden representar un porcentaje alto de la masa de la partícula dependiendo de la ubicación geográfica y el periodo del año.

Asimismo, Llanos (2017) realizó un análisis de la composición química del material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) en el aire ambiental de la UNALM para el periodo de julio a setiembre del año 2016, encontrando que el metal predominante en el PM<sub>2,5</sub> es el sodio mientras que para el caso de aniones la concentración de sulfato es mayor que la de nitrato.

#### **2.4 Clasificación de las fuentes del material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>)**

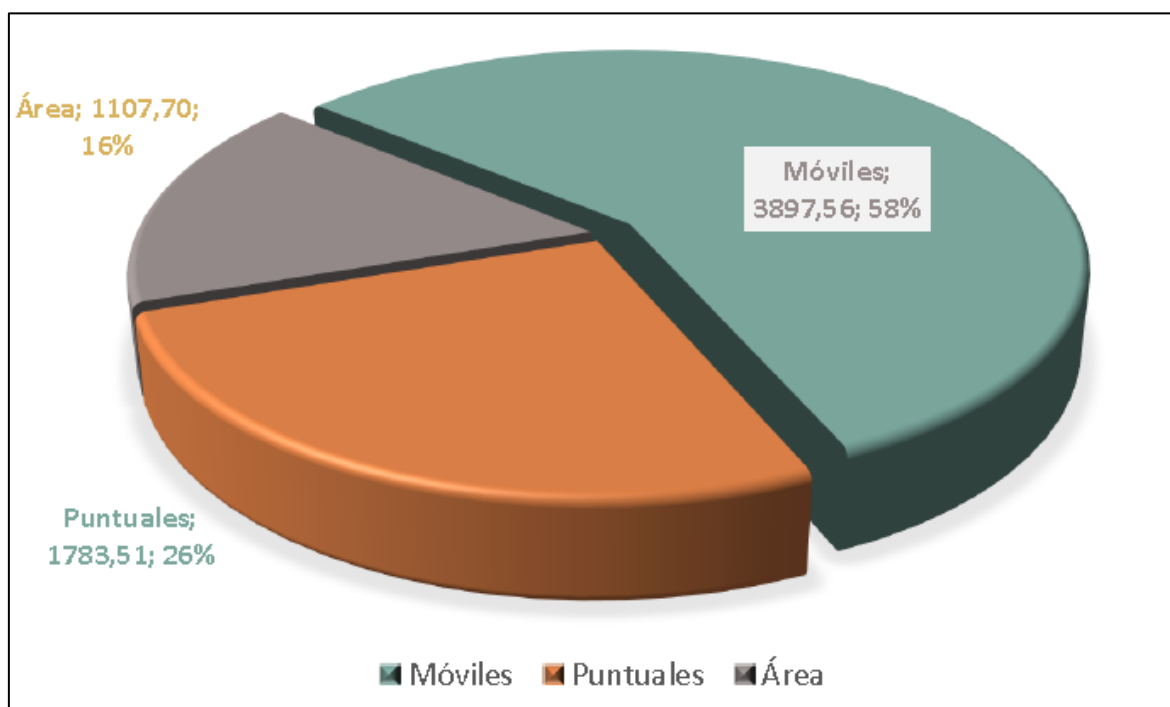
Como, ya se mencionó la composición de material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) varía ampliamente en su composición, dimensión y tamaño, entre otros factores debido a su fuente de emisión. Los principales generadores de PM<sub>2,5</sub> son los procesos de combustión interna vehicular, generación de energía para el sector industrial y en menor proporción las vías no pavimentadas, centros de comida, aparatos de calefacción (Azzi *et al.*, 2017)

Existen diversos modelos de clasificación para el material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>), el más usado lo divide en dos fuentes (Instituto Nacional de Ecología, 2011):

- a. **Fuentes naturales:** Se entiende por aquellas donde la emisión del contaminante atmosférico se realiza sin la participación de las actividades humanas. Se tienen por ejemplo las provenientes del suelo erosión eólica, incendios forestales silvestres, tormentas eléctricas que producen dióxido de nitrógeno; en ciudades costeras la sal es una fuente principal de material particulado.
- b. **Fuentes antrópicas:** Se entiende por aquellas donde la emisión del contaminante atmosférico se realiza debido a las actividades humanas. Asimismo, estas fuentes se dividen en subtipos como sigue:

- Fuentes móviles: Se incluyen todos los medios de transporte que usan un motor de combustión para generar energía, como motocicletas, buses públicos, así como aquellos que no circulan en vías de transporte como los tractores, embarcaciones marinas, equipos de construcción.
- Fuentes estacionarias o fijas: Se define como una instalación ubicada en un solo lugar, cuya finalidad sea el desarrollo de un proceso industrial, comercial, servicio que genere emisiones de material particulado. Se tiene por ejemplo, chimeneas de gran magnitud, molienda de cemento, plantas de energía, etc.
- Fuentes de área: Se incluyen todas aquellas actividades dispersas dentro de un lugar determinado que, en conjunto, sus emisiones son significativas. Ejemplo de ello son las tintorerías, panaderías, carpinterías, grifos, resuspensión de polvos de caminos.

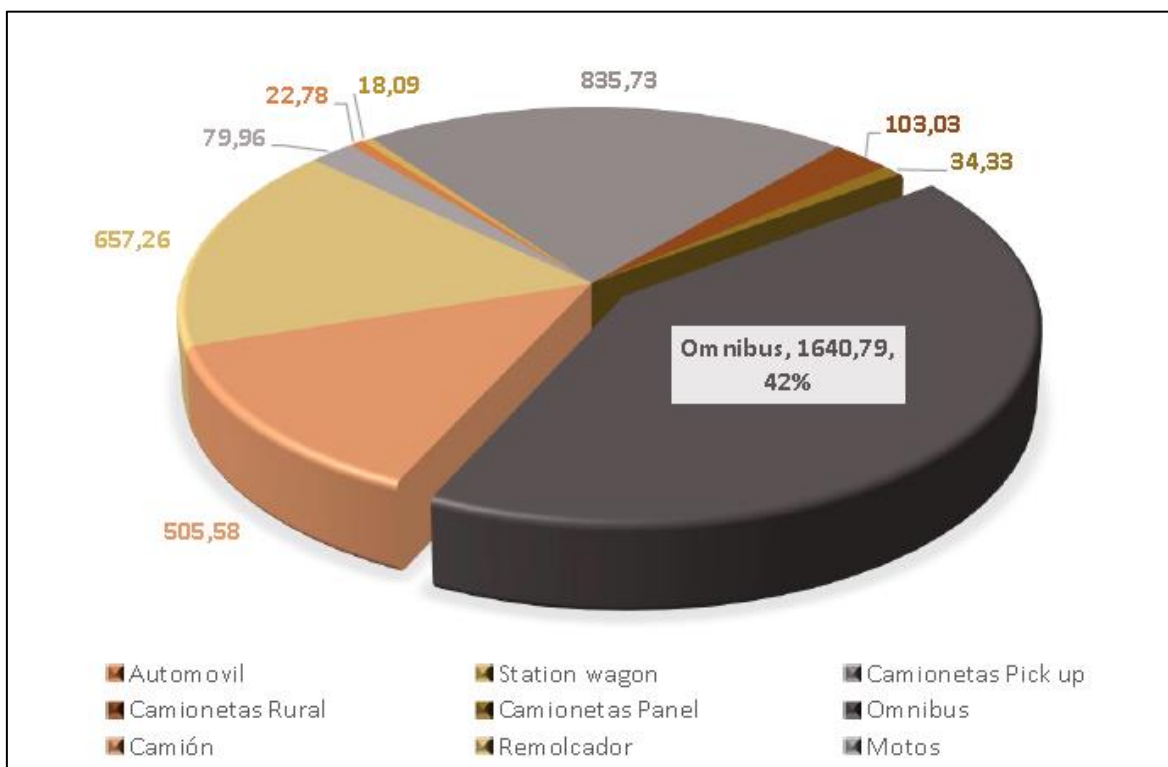
Asimismo, el Ministerio del Ambiente (2019) realizó un inventario de emisiones del parque automotor en el ámbito de Lima y Callao, tomando como año base al 2016. El estudio evidenció que las emisiones de material particulado fino ( $PM_{2,5}$ ) (6788,77 ton/año) se deben predominantemente a la combustión interna de los vehículos (fuentes móviles) representando un 58 por ciento del aporte total, lo que se describe en la Figura 2.



**Figura 2:** Emisiones de  $PM_{2,5}$  por tipo de fuente en Lima y Callao (Ton/año - 2016)

FUENTE: MINAM, 2019

Asimismo, de la evaluación por categoría vehicular, la categoría de ómnibus a diésel representa el 42 por ciento del total de vehículos en Lima-Callao (Figura 3), siendo éstos los que emiten más PM<sub>2,5</sub>. Otro aspecto a resaltar es que los vehículos de tecnología Pre-Euro (14 años o más de antigüedad) representan un 65 por ciento (2467,31 ton/año) del total de emisiones por tecnología vehicular, los que representan el principal aporte de material particulado fino de las fuentes móviles.



**Figura 3:** Emisiones de PM<sub>2,5</sub> por categoría vehicular el Lima y Callao (Ton/año - 2016)

FUENTE: MINAM, 2019

### 2.5 Variables meteorológicas que afectan la concentración del PM<sub>2,5</sub>

DIGESA (2005) recomienda que para un monitoreo de calidad de aire se debe realizar en paralelo un monitoreo meteorológico, debido a la influencia del clima sobre la dispersión del contaminante. Para ello se han definido una serie de parámetros a medir, los cuales pueden ser obtenidos mediante una estación meteorológica cercana al área o la instalación de una estación portátil in situ, se tiene lo siguiente:

- a. **Temperatura del aire:** Determina los movimientos de la masa de aire y por ende las condiciones de estabilidad o inestabilidad atmosférica. Una evaluación vertical de la temperatura puede indicar una situación de inversión térmica la cual dificulta la

dispersión del contaminante (Calvo *et al.*, 2001). Eatough *et al.* (2003) señalan que la concentración del material semivolátil en el PM<sub>2,5</sub> no disminuye, por efectos de volatilización, durante la estación de invierno, debido a las bajas temperaturas. Por otro lado, debido a las bajas temperaturas, la concentración del material particulado aumenta por la quema de carbón y leña como calefacción en el hogar.

- b. Velocidad y Dirección del viento:** La velocidad del viento señala la capacidad de dispersión del contaminante, mientras que la dirección del viento señala la zona hacia donde se puede el material particulado. La cuenca atmosférica de Lima-Ancón, abierta por el Oeste y cerrada por la cordillera de los Andes, define la dirección del viento de Sur a Norte a través de la zona costera (Pedroza y Tamayo, 2000).
- c. Humedad relativa:** Un alto porcentaje de humedad relativa aumenta el nivel de condensación del agua en el aire atmosférico, lo cual favorece a la formación de las partículas finas debido a su alta afinidad por el agua (Chakrabartia *et al.*, citado por Freyle *et al.*, 2012).
- d. Precipitación:** Producen un efecto de lavado en la atmósfera al arrastrar el material particulado al suelo. Debido a la influencia del Anticiclón del Pacífico Sur, las masas de agua en la superficie marina son frías, por lo que la precipitación en la zona de Lima es escasa, esto conlleva a una baja nubosidad y un alto porcentaje de humedad relativa (Pedroza y Tamayo, 2000).
- e. Radiación solar:** Un alto índice de radiación favorece a la formación de precursores del material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) de origen secundario (Calvo *et al.*, 2001).

Es preciso mencionar que Murriel (2016) realizó un trabajo de investigación en el campus de la UNALM determinando que la concentración de material particulado PM<sub>2,5</sub> varió durante el cambio estacional (invierno a primavera), registrando los mayores valores en la estación de invierno, esto se explicó, en parte, a la relación inversa con los parámetros meteorológicos: temperatura, velocidad del viento y radiación solar, y valores altos de humedad relativa que favorece la formación de PM<sub>2,5</sub>.

Asimismo, Leiva-Guzmán *et al.* (2017) mencionan que para el período de 2010 a 2015 en el área de Lima metropolitana y Callao se observó una fluctuación estacional en las concentraciones de material particulado la cual se podría explicar por la presencia de una capa de inversión térmica por subsidencia.

## 2.6 Métodos de Determinación de la concentración del material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) atmosférico en suspensión

Actualmente existen diversos métodos para la medición del material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>), por lo que es fundamental elegir la metodología más adecuada, según el objetivo del monitoreo del contaminante, para evitar pérdidas económicas como datos no confiables o de poca utilidad. DIGESA (2005) define una serie de criterios para elegir el mejor método de medición: límite de detección del equipo, sensibilidad, el grado de exactitud y precisión, el tipo de calibración, el tiempo de respuesta del equipo, etc.

Las Guías de la Calidad del Aire de la OMS (2005), clasifican a los métodos de monitoreo según sus *costos* y *nivel de desempeño* en cuatro:

- a. **Sistemas manuales pasivos:** Es el método más simple y económico para determinar de forma general la calidad del aire en una determinada área. Se usan con mayor frecuencia para gases y vapores mediante el uso de tubos pasivos, en el caso de material particulado se usa para determinar las Partículas Totales en Suspensión (PTS), sobre todo en zonas donde no se realizan monitoreos regularmente.
- b. **Sistemas manuales activos:** El método activo para material particulado sigue el principio gravimétrico donde una muestra de aire es succionada por una bomba eléctrica, a través de un cabezal diseñado para separar partículas mayores a las deseadas, posteriormente las partículas seleccionadas son colectadas en un filtro por un período de tiempo determinado, para luego ser analizada en el laboratorio y obtener la concentración del material particulado.
- c. **Sistemas automáticos:** Los analizadores automáticos proveen datos en alta resolución, a tiempo real y de forma online, mediante métodos ópticos como la fluorescencia UV, la fluorescencia o la quimioluminiscencia.
- d. **Sensores Remotos:** Son instrumentos que usan técnicas espectroscópicas para medir concentraciones en tiempo real.

Por otro lado, el Código de Reglamentación Federal de la USEPA divide los métodos de monitoreo de material particulado, por su *grado de exactitud* en:

- a. **Método Federal de Referencia:** Incluye todos aquellos equipos de medición que han sido desarrollados para un contaminante específico siguiendo un protocolo de pruebas y análisis; esto implica que los resultados obtenidos mediante un método de referencia sean exactos y puedan ser comparables con los resultados obtenidos por

redes de monitoreo, así como que puedan usarse para evaluar el cumplimiento de la normativa ambiental respectiva para el contaminante. Para el caso del PM<sub>2,5</sub> el método de referencia aprobado y aceptado a nivel mundial es el de *separación inercial/filtración (gravimetría)*.

**b. Método Federal de Equivalencia:** Incluye todos aquellos equipos de medición que incorporan nuevas tecnologías o métodos de análisis, que han sido sujetos a pruebas adecuadas y cumplen con los requisitos mínimos de un equipo de muestreador. Estos métodos presentan una exactitud similar a los métodos de referencia y también son válidos para ser comparados con el ECA para aire. Se tienen tres clases:

- Clase I: Son aquellos métodos similares a los de referencia pero con pequeñas modificaciones tecnológicas. Estos equipos deben ser probados para asegurar que su rendimiento no se vea afectado (Beaver *et al.*, 2014).
- Clase II: Son aquellos métodos que obtienen una muestra integrada de material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) después de 24 horas en un filtro, mediante filtración gravimétrica; se diferencia de un método referencial por tener modificaciones significativas en el diseño o rendimiento del equipo como: tener una entrada diferente, el uso de un muestreador dicotómico, una tasa de flujo volumétrico distinta, etc (Beaver *et al.*, 2014).
- Clase III: Son aquellos métodos que proveen concentraciones representativas del contaminante de una hora o menos, así como de 24 horas o el promedio de 24 mediciones consecutivas de una hora.

En nuestro país se oficializó la norma técnica peruana: *NTP 900.069:2017*, como método de referencia para la determinación del material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) en la atmósfera, con fecha 29 de diciembre de 2017. Esta norma define como equipo, un muestreador eléctrico con una entrada especial que toma aire a un flujo nominal de aire de 16,67 l/min (bajo volumen), las partículas absorbidas serán separadas a través de un impactador dejando pasar únicamente aquellas dentro del rango de tamaño de PM<sub>2,5</sub>, las que serán recolectadas en un filtro de teflón (PTFE) durante un periodo de 24 ± 1 horas; la concentración final del contaminante se determinará por el pesaje del filtro estabilizado y dividido entre el volumen estándar muestreado, expresado en (µg/m<sup>3</sup>).

## **2.7 Evaluación comparativa de las metodologías de muestreo del PM<sub>2,5</sub>**

El efecto que tiene el material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) en la salud de las personas es ampliamente conocido y estudiado, por lo que actualmente se cuentan con una serie de metodologías para medir su concentración en el aire ambiental. Dado que el método de análisis más aplicado es el de separación inercial (gravimetría), es necesario que cuando un nuevo equipo “candidato” para método de referencia demuestre su competencia técnica mediante pruebas de exactitud y precisión a través de estudios de correlación con un método referenciado, tal como lo exige la DIGESA (2005). Generalmente, una calibración en campo implica colocar el equipo que se desea corregir y el equipo gravimétrico de referencia, para luego determinar un factor escalar o una curva de calibración para que los datos medidos por el muestreador encajen mejor con los datos reportados por el de referencia.

### **2.7.1 Experiencia internacional**

Existen diversos casos de evaluación comparativa aplicada a muestreadores en diversas partes del mundo, las cuales serán desarrolladas a continuación:

#### **A. Canadá**

Chow *et al.* (2016) realizaron un estudio en una zona residencial en Fort McMurray en la provincia de Alberta, Canadá, comparando dos equipos equivalentes que miden PM<sub>2,5</sub> de forma continua (TEOM operado a 40°C y SHARP) con un equipo de referencia Partisol PM<sub>2,5</sub>; el periodo de tiempo comprende desde Junio de 2011 hasta Mayo de 2013.

Pruebas no paramétricas fueron aplicadas a los datos obtenidos incluyendo la prueba de suma de rangos Mann-Whitney, la correlación de orden de rango Spearman, el análisis de tendencia de Mann-Kendall y el análisis de pendiente de Sen. Se realizó una regresión lineal simple y una regresión ortogonal entre los equipos Partisol y TEOM para ajustar este último, en la época fría; así como una regresión ortogonal entre los equipos TEOM y SHARP para corregir información histórica del muestreador TEOM.

Como resultado, se obtuvo una correlación razonable entre el Partisol y los otros dos equipos, con un  $r=0,83-0,84$  y una rango de pendiente de  $0,78-0,95$ . Al aplicar la regresión lineal simple entre el equipo Partisol y TEOM se encontró una correlación cercana al 1, para el 30 por ciento de los datos, mientras que aplicando la misma regresión para los equipos Partisol y SHARP se encontró una correlación cercana a 1, para el 10 por ciento de los datos. Aplicando la regresión ortogonal, se comprueba que es más potente respecto a la regresión

lineal para el Partisol y TEOM durante la mayor parte del periodo de muestreo, mientras que para los equipos TEOM y SHARP se aplicó para concentraciones históricas encontrándose una complementación de datos de 91-100 por ciento.

## **B. España**

El gobierno del Principado de Asturias en España, mediante una orden el 26 de enero de 2018, decidió regular la aplicación del factor de corrección en cualquiera de los analizadores de partículas designados a evaluar la calidad de aire respecto al método de referencia descrito en la norma UNE-EN 12341:2015. El Principado de Asturias cuenta en su red de monitoreo con equipos automáticos de absorción beta marca DASIBI y MET ONE, los cuales fueron evaluados usando la metodología contenida en la Guía para los estados miembros sobre las medidas de PM<sub>10</sub> e intercomparación con el método de referencia, obteniéndose factores anuales globales de 0,9816 para los equipos marca DASIBI y 0,9779 para los equipos marca MET ONE.

## **C. Estados Unidos de América**

### Houston y Seattle

Holsen *et al.* (2007) realizaron un estudio en dos ciudades de Estados Unidos para evaluar equipos continuos y equipos gravimétricos para PM<sub>2,5</sub>; se usaron los muestreadores continuos: Monitor continuo másico ambiental (CAMM), muestreador másico ambiental total en tiempo real (RAMS) y la microbalanza oscilatoria del elemento cónico (TEOM), mientras que los muestreadores gravimétricos fueron el Partisol-Plus PM<sub>2,5</sub> (Houston) y el muestreador de especiación de aerosol de masa URG (MASS) (Seattle), para los años 2000 y 2001.

Se evaluó el nivel de concordancia entre las muestras obtenidas en los equipos continuos usando el análisis de varianza (ANOVA), debido a que estos equipos poseen cierto nivel de incertidumbre se usó una regresión lineal de mínimos cuadrado Deming. Para la ciudad de Houston se encontró un nivel de correlación del 89 por ciento para el CAMM y RAMS y de 94 por ciento para el TEOM, mientras que para la ciudad de Seattle se encontró un nivel de 87 por ciento para el CAMM, 78 por ciento para el RAMS y 97 por ciento para el TEOM.



## **D. Estados Unidos Mexicanos**

### Chihuahua

Debido a la inexistencia de un material de referencia o una atmósfera estándar con una concentración conocida de PM<sub>10</sub> para evaluar el rendimiento de un muestreador de material particulado, Acosta *et al.* (2015) realizaron en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), en simultáneo, muestreos continuos con tres equipos de alto volumen (Hivol) con cabezales de PM<sub>10</sub> (Graseby Andersen/GMW) y posteriormente con impactadores de cascada (Andersen Sierra, Serie 230). El estudio se realizó durante los años 2012 y 2013, en tres campañas separadas, en la ciudad de Chihuahua, México. Dichos muestreadores fueron previamente calibrados; acondicionados con filtros de fibra de vidrio, los que a su vez fueron estabilizados bajo condiciones de laboratorio.

El análisis estadístico, requirió una transformación logarítmica (en base 10) de los datos para que se ajusten a una distribución normal, puesto que la presunción de distribución normal no se ajustó para los datos obtenidos usando el impactador de cascada.

Posteriormente, los datos obtenidos fueron evaluados estadísticamente mediante un análisis de varianza (ANOVA), intervalos de confianza y pruebas t para medir las diferencias entre los resultados por equipo. La calidad de los datos se evaluó midiendo el límite de detección y límite de cuantificación de los filtros “blanco”, así como la robustez y la precisión del método de alto volumen.

Como resultado, el límite de detección y cuantificación, para los equipos con cabezales PM<sub>10</sub>, fueron de 0,56 µg/m<sup>3</sup> y 2,71 µg/m<sup>3</sup> respectivamente, mientras que para los impactadores de cascada, fueron de 0,54 µg/m<sup>3</sup> y 1,38 µg/m<sup>3</sup> respectivamente. Respecto a la precisión del método, para los equipos con cabezales PM<sub>10</sub>, fue de 3,28 por ciento, mientras que para los impactadores de cascada, fue de 6,8 por ciento. Finalmente la robustez, se observó que variando 2 mg en la masa se obtiene una variación de 1,27 µg/m<sup>3</sup> en la concentración, un error de medición de 5 minutos conlleva a una variación de 0,28 µg/m<sup>3</sup>, un cambio de 2,5°C repercute en una variación del 3,75 por ciento mientras que una modificación de 76 mmHg conlleva a una variación de 1,98 por ciento; todas estas variaciones pueden controlarse verificando que los equipos sean correctamente calibrados así como la balanza de medición.

Se concluye que el método de alto volumen es adecuado para medir  $PM_{10}$  y fracciones más pequeñas, en ambientes urbanos.

#### Guanajuato, Jalisco, Nuevo León y Tabasco

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático desarrolló el trabajo “Correspondencia entre las metodologías manual y automática para la medición de partículas suspendidas: Primera etapa”, publicado el 2017. En el estudio se desarrolló un protocolo de pruebas para comparar metodologías de muestreo manual y automático. Los equipos utilizados para el muestreo fueron: Automático (Equipo de atenuación de radiación beta y Equipo de microbalanza de elemento oscilante) y Manual (Equipo de alto volumen marca Andersen) por un período de tres meses (diciembre de 2016 a febrero de 2017) en cuatro estados: Guanajuato, Jalisco, Nuevo León y Tabasco. El protocolo propuesto sigue los siguientes pasos:

1. Actualización de estudios internacionales de comparación.
2. Análisis meteorológico a nivel nacional (temporalidad y representatividad).
3. Revisión de posibles Sistemas de Monitoreo Atmosférico (SMA) – determinación de sitios de muestreo.
4. Determinar el manejo limpieza y validación de la base de datos de medición manual y automáticas.
5. Proponer y definir el tipo de muestreo, calendario de muestreo y controles de calidad en el muestreo, tamaño de la muestra.
6. Determinación de variables claves.
7. Determinación de la comparación matemática entre las metodologías de medición automática y manual.
8. Análisis de resultados de la comparación matemática entre las metodologías de medición automática y manual.

Una vez obtenido los datos validados se aplicó dos metodologías estadísticas para comparar los equipos de medición:

- Modelo de Regresión Lineal Simple: Con un ajuste de mínimos de cuadrados para evitar el supuesto de normalidad de los datos a analizar. El objetivo de este modelo es identificar un ajuste lineal entre dos fenómenos.
- Pruebas no paramétricas: Estas se usaron para identificar el comportamiento de los datos obtenidos con los muestreadores, cuando la cantidad de datos de cada grupo

sea distinta. La prueba de La Mediana, se utilizó para identificar si las medianas de cada grupo eran similares. La prueba de Mann-Whitney, se utilizó para saber si existe diferencia entre ambos grupos.

Asimismo, gráficamente se empleó los “Diagramas de Cajas” para determinar si las distribuciones de los datos son similares.

Como conclusión se tuvo que el método de regresión lineal simple ofrece una subestimación en las mediciones de  $PM_{2,5}$  en el estado de Guanajuato y una sobreestimación en las mediciones de  $PM_{10}$  en el estado de Jalisco. Mientras que, las pruebas no paramétricas evidencian relación entre metodologías solo en el estado de Guanajuato y de forma similar se evidencia mediante el diagrama de caja.

### **E. Reino de Tailandia**

Prueksasit *et al.* (2018) realizaron un estudio con el objetivo de determinar los niveles de concentración del  $PM_{2,5}$  y  $PM_{10}$  en relación a las condiciones meteorológicas y el flujo de tránsito mediante el análisis de regresión lineal y el análisis de camino. El material particulado fue muestreado usando un impactador modular personal (PMI) conectado a una bomba de aire personal (SKG) durante el otoño-invierno de 2013 y la primavera 2013-verano 2014 durante una semana por cada periodo, en la ciudad de Bangkok. El equipo fue colocado en dos calles con diferentes configuraciones: una calle abierta y una calle cerrada por tiendas comerciales y un tren en la parte superior. Se midieron variables meteorológicas (velocidad de viento, humedad relativa y temperatura) y vehiculares (flujo ligero de vehículos de gasolina, flujo ligero de vehículos de GLP, flujo pesado de vehículos diésel, flujo ligero de vehículos diésel y flujo de motocicletas).

Los datos recolectados se analizaron usando modelos de ecuaciones estructurales (MEEs), estos modelos de regresión ordinario incorporan múltiples variables dependientes e independientes. Se aplicaron dos modelos:

Regresión lineal paso a paso (stepwise regression): Este método evalúa la significancia de cada variable que se introduce al algoritmo.

Análisis de rutas: Este modelo evalúa las variables medidas y variables inferidas, permitiendo una representación más correcta de los datos.

Previamente, se determinó la normalidad de las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$  utilizando la prueba de Kolmogorov-Sminov con valores p-valor de 0,052 y 0,062 respectivamente.

Del estudio se concluyó que los factores meteorológicos guardan una fuerte correlación con la concentración del material particulado en áreas abiertas, mientras que en áreas cerradas el tráfico vehicular tiene una mayor relevancia sobre la meteorología. Por otro lado, se resolvió que el análisis de rutas es un estadístico más significativo para la determinación del contaminante atmosférico debido a su manejo de variables inferidas.

#### **F. República del Perú**

Ibáñez (2008) realizó un estudio comparativo entre metodologías de referencia y equivalentes para material particulado atmosférico en el distrito de El Agustino (Lima), para el período de abril a setiembre del 2007 utilizando los equipos muestreadores: TEOM, STAPLEX, PARTISOL y MINIVOL.

Como primer paso, evaluó la normalidad de los datos obtenidos en cada equipo muestreador aplicando el test de Ryan Joiner con un estadístico de probabilidad del 95 por ciento ( $p > 0,05$ ) y posteriormente, para determinar si existe una regresión lineal entre las concentraciones tomadas dos a dos se aplicó la prueba estadística F. Como segundo paso, una vez determinada la relación estadística entre los valores obtenidos se procedió a aplicar los modelos de regresión lineal para pequeños tramos de intervalo de tiempo. Finalmente, y con el objetivo de homogenizar todos los valores de corrección obtenidos previamente se comparó los valores corregidos respecto a los valores originales, verificando una variación menor al 10 por ciento para los equipos tomados de dos en dos.

De los resultados obtenidos Ibáñez encontró que los factores calculados varían en función del período del año. De la comparación realizada entre el TEOM vs PARTISOL se encontró tres factores de corrección: 1,5081 (18 de junio al 20 de julio), 1,5488 (24 de julio al 22 de agosto) y 1,3801 (23 de agosto a 7 de setiembre) no siendo recomendable calcular un solo factor de corrección debido a que no se cumple el requisito de variación máxima de 10 por ciento entre los datos corregido y los datos originales. De la comparación realizada entre TEOM vs STAPLEX se encontró tres factores de corrección: 1,5381 (14 de julio a 22 de agosto) y 1,3758 (25 de agosto a 7 de setiembre) no siendo recomendable calcular un solo factor de corrección debido a que no se cumple el requisito de variación máxima de 10 por ciento entre los datos corregidos y los datos originales.

## **G. República Popular China**

Cai *et al.* (2017) realizaron un estudio de validación de un sensor de PM<sub>2,5</sub> por dispersión de luz (QT-50) usando un sensor de referencia MicroPEM y el método gravimétrico, el estudio se realizó en Shangai en tres lugares distintos: en una oficina de la universidad de Fundan, en un dormitorio de la universidad de Fundan y en un edificio de ocho pisos a 2 kilómetros lejos de la universidad de Fundan; el período de muestreo fue de ocho meses desde Julio de 2015 hasta Febrero de 2016.

Para comparar los tres grupos de datos obtenidos en cada muestreador se aplicó la prueba no paramétrica U Mann-Whitney, posteriormente se aplicó en análisis de correlación de Spearman en grupos de dos en dos. Finalmente la validación del sensor QT-50 se realizó mediante una regresión lineal múltiple la cual se ajustó para la temperatura y humedad relativa, el mismo proceso se usó para la validación del MicroPEN usando el método gravimétrico como variable dependiente.

Como resultado se obtuvieron en promedio concentraciones de 47,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para el QT-50, 36,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para el MicroPEM y 39,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para el método gravimétrico. Los datos obtenidos por el muestreador QT-50 mejoraron, respecto a la línea ideal  $Y=X$ , mediante la calibración básica entre el método gravimétrico y el QT-50 indicando un incremento del  $R^2$  de 0,75 a 0,81.

### **2.8 Estándares de calidad ambiental para aire**

Debido a la afectación, del material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>), en la salud de las personas diferentes organizaciones; la Autoridad Ambiental Nacional definió el concepto de “Estándar de Calidad Ambiental” (ECA) 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 o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente (Ley N° 28611). Para el caso específico del PM<sub>2,5</sub>, mediante Decreto Supremo N° 074-2001-PCM, se estableció por primera vez un valor referencial de 65  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para un periodo de 24 horas y 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para un periodo anual; posteriormente, mediante Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM, se aprobaron nuevos valores Estándares de Calidad Ambiental de Aire para el material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) y otros contaminantes, 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para un período de 24 horas desde el 01 de enero de 2010 y 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para un período de 24 horas desde el 01 de enero de 2014; finalmente, mediante Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, se aprueban

los valores actuales de calidad ambiental para el material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) y otros contaminantes, 50 µg/m<sup>3</sup> para un período de 24 horas y 25 µg/m<sup>3</sup> para un período anual.

Así como Perú, otros países y organismos han adoptado estándares de calidad ambiental para este contaminante atmosférico, algunos de ellos se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1. Valores estándares establecidos para PM<sub>2,5</sub>**

PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Perú (MINAM)	Chile	China		USEPA	Unión Europa	Organización Mundial de la Salud
			Grado I *	Grado II **			
Media 24 horas	50	50	35	75	35	-	25
Media anual	25	20	15	35	12 (primario) 15 (secundario)	25	10

FUENTE: Adaptado de Azzi *et al.*, 2017

\* Zonas con necesidad de protección

\*\* Ciudades o zonas rurales

## 2.9 Índice de Calidad del Aire – INCA

En base a los valores de concentración del PM<sub>2,5</sub> y considerando su estándar de calidad ambiental, se puede definir el estado actual de la calidad de aire para este contaminante y así definir medidas para prevenir y reducir los efectos negativos en la salud de las personas.

**Tabla 2: Índice de Calidad Ambiental para PM<sub>2,5</sub> promedio 24 horas**

CALIFICACIÓN	INTERVALOS DE CONCENTRACIÓN	VALORES DEL INCA
Buena	0 – 25	0 – 50
Moderada	25.1 - 50	51 – 100
Mala	50.1 – 125	101 – 500
Valor umbral del estado de cuidado	>125	>500

FUENTE: Adaptado de la R.M. N° 181-2016-MINAM

Mediante Resolución Ministerial N° 181-2016-MINAM, el Ministerio del Ambiente estableció el Índice de Calidad de Aire - INCA, así como el Sistema de Información de Calidad de Aire - INFO AIRE PERÚ, el cual se establece tomando como referencia los Estándares de Calidad Ambiental; para el caso del PM<sub>2,5</sub> se tienen los valores descritos en la Tabla 2.

Para cuantificar el valor del INCA se considera la concentración estimada de material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) y el valor en el ECA – Aire, para ello se aplica la siguiente ecuación:

$$I (PM_{2,5}) = [PM_{2,5}] * 100/50$$

Donde:

I: Índice nacional de calidad ambiental

[ ]: Concentración del contaminante

En base a la calificación del INCA, se definen cuidados y recomendaciones las mismas que se describen en la Tabla 3:

**Tabla 3: Cuidados y recomendaciones del Índice de Calidad del Aire**

<b>Calificación</b>	<b>Cuidados</b>	<b>Recomendaciones</b>
Buena	La calidad del aire es satisfactoria y no representa un riesgo para la salud	La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA de Aire. Puede realizar actividades al aire libre.
Moderada	La población sensible (niños, tercera edad, madres gestantes, personas con enfermedades respiratorias crónicas y cardiovasculares) podría experimentar algunos problemas de salud.	La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA de Aire. Puede realizar actividades al aire libre con ciertas restricciones para la población sensible.
Mala	La población sensible podría experimentar problemas de salud. La población en general podría sentirse afectada.	Mantenerse atento a los informes de calidad del aire. Evitar realizar ejercicio y actividades al aire libre.
Umbral de cuidado	La concentración del contaminante puede causar efectos en la salud de cualquier persona y efectos serios en la población sensible tales como niños, tercera edad, madres gestantes, personas con enfermedades respiratorias crónicas y cardiovasculares	Reportar a la Autoridad de Salud para que declare los Niveles de Estados de Alerta de acuerdo al Decreto Supremo N° 009-2003-SA y su modificatoria Decreto Supremo N° 012-2005-SA.

FUENTE: R.M. N° 181-2016-MINAM



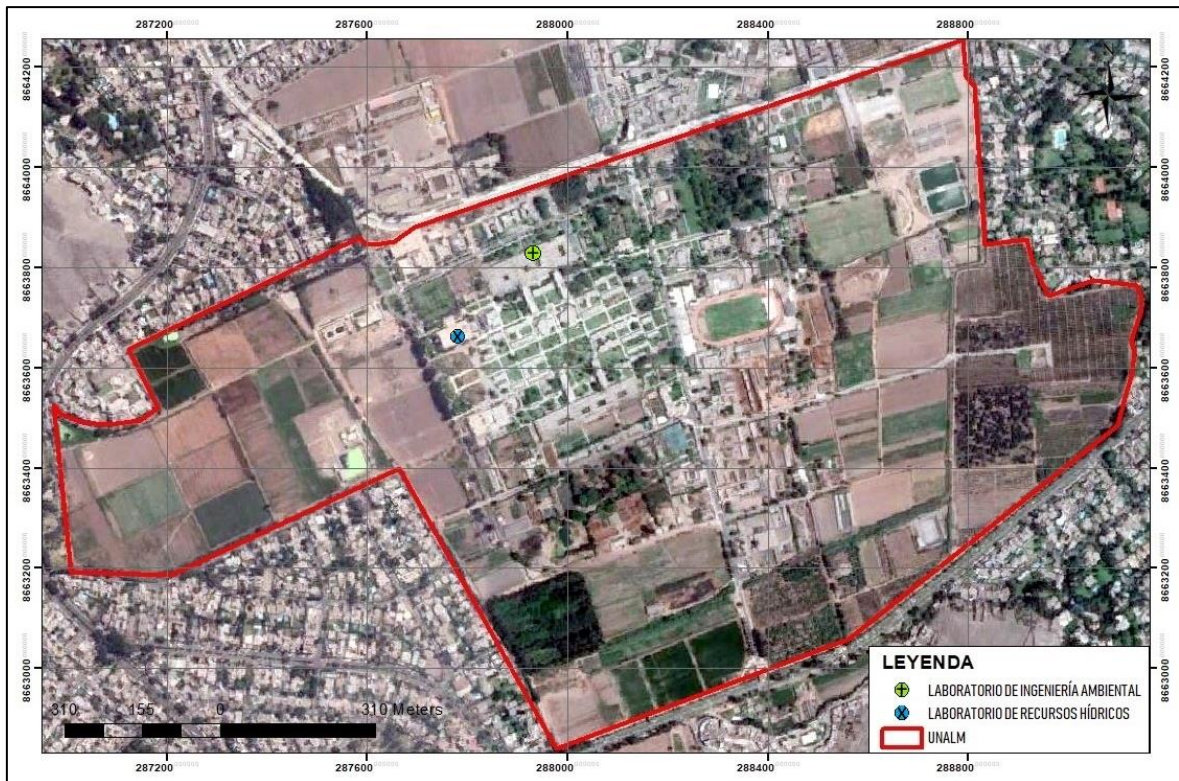
### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Descripción del lugar**

La presente investigación se realizó en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina, distrito de La Molina y provincia de Lima. Se eligió el laboratorio de ingeniería ambiental, un edificio de dos pisos localizado a aproximadamente 50 metros de la avenida La Molina. Los equipos se ubicaron específicamente la azotea del edificio, cuya altura con relación al suelo es de 6,15 metros aproximadamente. La fase de muestreo se realizó desde el 07 de diciembre de 2018 hasta el 31 de marzo de 2019.

El laboratorio de ingeniería ambiental se encuentra ubicado en las coordenadas 8663900N 287883E (ver Figura 4), siendo las principales fuentes de influencia en el material particulado PM<sub>2,5</sub>: los cerros aledaños a la universidad, el tránsito vehicular en las principales avenidas cercanas y los terrenos no afirmados (campos agrícolas); respecto a su clasificación climática de la zona por Javier Pulgar Vidal en su tesis de 1941 (Pulgar, 2014), le corresponde la región natural Chala, definida por la cordillera de los Andes y el anticiclón del Pacífico.

Las condiciones meteorológicas de la UNALM incluyen una temperatura promedio mensual de entre 14,6°C a 28,7°C, una precipitación media mensual de 13,5 mm y una humedad relativa de 88 por ciento (INIA; citado por Quiñones, 2016), así como una dirección predominante del viento proveniente del suroeste.



**Figura 4: Ubicación de la zona de estudio dentro del campus de la UNALM**

FUENTE: Elaboración propia usando mapas de Google Earth, 2018

### 3.2 Materiales para el muestreo

- Filtros de fibra de cuarzo de 8 x 10 pulgadas
- Filtros de fibra de vidrio de 47 milímetros de diámetro
- Filtros de fibra de teflón de 46,2 milímetros de diámetro
- Sobres manila tamaño oficio para transporte de filtros de 8 x 10 pulgadas
- 01 placa de aluminio porta filtro para los filtros de 8 x 10 pulgadas
- Placas Petri especiales para transporte de los filtros de 47 mm. y 46,2 mm.
- Papel bulky A-4.
- Bolsas tipo ziploc
- 01 Plumón marcador
- 01 Cinta adhesiva

### 3.3 Materiales de laboratorio

- 02 cajas de guantes de nitrilo
- 02 cajas de cubreboca

- 01 Pinza de acero punta plana

### **3.4 Materiales de Gabinete**

- Datos de concentración validados de PM<sub>2,5</sub> proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) del Perú, período diciembre 2018 – marzo 2019.
- Datos de variables meteorológicas proporcionadas por el Laboratorio de Recursos Hídricos de la UNALM, período diciembre 2018 – marzo 2019.
- Datos de concentración de PM<sub>2,5</sub> del monitor de calidad de aire de la Embajada de los Estados Unidos de América, período diciembre 2018 – marzo 2019.

### **3.5 Equipos**

#### **a) Muestreador activo de Alto Volumen para PM<sub>2,5</sub> modelo Hivol – 3000 marca Ecotech**

Este equipo opera según el método gravimétrico de alto volumen referenciado por la USEPA bajo la designación RFPS-0706-162 aprobado para medir PM<sub>10</sub>, siendo reemplazado el cabezal original por uno que mida PM<sub>2,5</sub>. El equipo opera a un flujo constante de 1130 L/min. El material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) es almacenado en filtros de fibra de vidrio de 8x10 pulgadas en períodos de 24 ±1 horas.

El equipo funciona de la siguiente manera: El aire ambiental es aspirado de forma simétrica por la bomba del muestreador a través de la abertura del cabezal en la parte superior; dentro del cabezal las partículas con un diámetro aerodinámico mayor a 2,5 µm quedan retenidas en la superficie de la cámara (por su momento de inercia) mientras que las menores se aceleran a través de las toberas y son retenidas en un filtro receptor; finalmente el aire limpio es expulsado por el extremo opuesto del equipo.



**Figura 5: Equipo muestreador de alto volumen – Hivol 3000**

**b) Muestreador activo de Bajo Volumen para PM<sub>2,5</sub> modelo Partisol 2000H marca Rupprecht & Patashnick**

Este equipo opera según el método gravimétrico de bajo volumen referenciado por la USEPA bajo la designación RFPS-0498-117, siendo uno de los muestreadores más utilizados para medir PM<sub>2,5</sub> en el mundo, este método puede ser considerado como de referencia a nivel nacional básicamente debido al flujo al que trabaja (16,7 l/min). El PM<sub>2,5</sub> es almacenado en filtros de politetrafluoroetileno (PTFE teflón) de 47 mm. en períodos de 24 ±1 horas.

El equipo funciona de la siguiente manera: El aire ambiental es aspirado por la bomba eléctrica, a un flujo de 16,7 L/min, del muestreador a través de una entrada diseñada para evitar insectos, precipitación y cambios en la velocidad y dirección del viento; posteriormente, un impactador integral elimina partículas mayores a 10  $\mu\text{m}$  (Tolocka *et al.*; citado por Gemmill *et al.*, 2001) mientras que un segundo separador inercial “*well impactor ninety-six*” (WINS) remueve partículas mayores a 2,5  $\mu\text{m}$  (Peters *et al.*; citado por Gemmill *et al.*, 2001) ver Figura 6, mientras que las menores se acelera a través de las toberas y son retenidas en un filtro receptor; finalmente el aire limpio es expulsado por el extremo opuesto del equipo.



**Figura 6: Equipo muestreador de bajo volumen – Partisol 2000H**

**c) Muestreador automático de Bajo Volumen para PM<sub>2,5</sub> modelo Microvol – 1100 marca Ecotech**

Este equipo opera según el método gravimétrico de bajo volumen referenciado por los estándares australianos / neozelandeses (AS/NZS) bajo la designación 3580.9.10:2006 aprobados para medir PM<sub>2,5</sub>. El equipo opera a un flujo constante de 3 L/min. El material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) es almacenado en filtros de fibra de cuarzo de 47 mm. en períodos de 24 ±1 horas.

El equipo funciona de la siguiente manera: El aire ambiental es aspirado a través de la tapa contra la lluvia y la malla para insectos de acero inoxidable en la parte superior; posteriormente el aire se acelera en la boquilla, siendo las partículas con un diámetro aerodinámico mayor a 2,5 µm quedan retenidas en la placa de impacto mientras que las menores son retenidas en un filtro receptor; finalmente el aire limpio es expulsado por el extremo opuesto del equipo.



**Figura 7: Equipo muestreador de bajo volumen – Microvol 1100**

#### **d) Desecador tipo olla**

Este recipiente de forma similar a una olla contiene gel de sílice (silicagel absorbente), un agente que retiene la humedad de los filtros colocados dentro del desecador y lo protege de la humedad del exterior.



**Figura 8: Desecador con filtros para material particulado**

#### **e) Balanza analítica**

Para el pesado de los filtros utilizados en el presente trabajo se utilizó una balanza analítica con una resolución mínima de 0,01 gramos, de marca A&D modelo GH 200.



**Figura 9: Balanza analítica A&D – GH 200**

## **f) Laptop Core i7**

Se utilizó una computadora personal con los siguientes programas instalados: Microsoft Excel, ArcGis 10.1, Minitab 18 y WRPLOT View 8.0.0.

## **3.6 Metodología**

Para el desarrollo de este estudio se consideraron los siguientes documentos:

- DIGESA: Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de datos.
- Guía para los Estados Miembros sobre medidas de  $PM_{10}$  e Intercomparación con el método de referencia.
- Ibáñez, L.2008. Comparación entre las metodologías de muestreo equivalentes y de referencia del material particulado atmosférico, en la ciudad de Lima. Tesis de Pre grado en Ing. Ambiental. Lima: Universidad Nacional Agraria la Molina
- Murriel. F. 2016. Determinación del nivel de contaminación atmosférica por  $PM_{2,5}$  en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Tesis de pregrado en ingeniería ambiental. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- NTP 900.069.2017: Norma Técnica Peruana de Gestión Ambiental: Método de referencia para la determinación de material particulado fino como  $PM_{2,5}$  en la atmósfera.
- USEPA Reference and equivalent method applications: Guidelines for applicants.
- USEPA Quality assurance guidance document 2.12: Monitoring  $PM_{2,5}$  in Ambient Air Using Designated Reference or Class I Equivalent Methods.

A continuación se describe la metodología necesaria para poder alcanzar los objetivos específicos planteados:

### **3.6.1 Determinación de la variación temporal del material particulado fino ( $PM_{2,5}$ )**

#### **a) Criterios de selección del lugar de muestreo**

El lugar definido para el desarrollo de la fase experimental, fue definido siguiendo las recomendaciones del Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de datos de DIGESA (2005), entre los cuales se especifica lo siguiente:



- Acceso y seguridad del sitio de instalación
- Evitar la influencia de árboles, edificios e infraestructuras.
- Duración del programa de monitoreo
- Distancia mayor a 20 metros de fuentes industriales, domésticas o de alto tránsito vehicular.
- Suministro constante de energía eléctrica.

La USEPA (2006), define en su Parte 53, sub parte C; que los equipos muestreadores deben ser colocados a la misma altura sobre el nivel del suelo y a una distancia mínima de 2 metros.

### **b) Calibración de los equipos**

Para la realización del presente estudio fue necesario que los equipos estén en perfectas condiciones, para lo cual se realizó la calibración de los tres equipos a utilizarse. Cabe señalar que los muestreadores fueron calibrados para los parámetros de flujo, temperatura y presión atmosférica; por la empresa Green Group Perú SAC, la cual cuenta con un laboratorio de calibración acreditado bajo la norma NTP/ISO 17025:2006 ante el Instituto Nacional de Calidad (INACAL) desde el año 2016. Asimismo previo al inicio del muestreo se realizó el mantenimiento manual de los equipos. En el Anexo 11 se muestran los certificados de calibración de los tres muestreadores.

### **c) Determinación de la concentración de material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>)**

#### **c.1) Periodo y frecuencia de monitoreo**

El período de muestreo inició el 07 de diciembre de 2018 hasta el 31 de marzo de 2019.

Las muestras fueron colectadas de manera simultánea para los tres equipos con una frecuencia interdiaria, con el objetivo de tener información de todos los días de la semana.

En el Anexo 1 se muestra la frecuencia y cronograma de monitoreo.

#### **c.2) Selección de filtros por equipo muestreador**

Los filtros a utilizarse se rigen por los requerimientos de la Norma Técnica Peruana NTP 900.069.2017 y los respectivos manuales de cada equipo. Siendo las características de cada uno las siguientes:

- Hivol – 3000 : Filtros de fibra de vidrio de 8 x 10 pulgadas, 2,2  $\mu\text{m}$  de espesor
- Microvol – 1100 : Filtros de fibra de cuarzo de 47 mm, 2,5  $\mu\text{m}$  de espesor
- Partisol 2000H : Filtros de fibra de cuarzo de 47 mm, 2,5  $\mu\text{m}$  de espesor  
Filtros de politetrafluoruro de etileno (teflón) de 46,2 mm, 2,0  $\mu\text{m}$  de espesor

### **c.3) Etapas del muestreo de $\text{PM}_{2,5}$**

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizaron los equipos descritos en el numeral 3.5, mismos que fueron facilitados por el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria La Molina. El principio de muestreo de estos muestreadores es el gravimétrico (separación inercial/filtración)

De acuerdo a los lineamientos descritos en la NTP 900.069.2017, en la Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6, se describe el procedimiento seguido para el muestreo del material particulado fino ( $\text{PM}_{2,5}$ ) para la etapa de pre-muestreo, muestreo y post-muestreo, respectivamente. Tanto la etapa de pre muestreo como la etapa de post muestreo se realizaron en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la UNALM, ya que éste cuenta con las instalaciones y equipos necesarios para un correcto tratamiento de las muestras con  $\text{PM}_{2,5}$ . Por otro lado, la etapa de toma de muestra se realizó en la azotea del mismo laboratorio.

**Tabla 4: Etapa de pre-muestreo PM<sub>2,5</sub>**

Condiciones del filtro	Condiciones Generales	
	De Laboratorio	De Campo
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se inspeccionó cada filtro para descartar picaduras, partículas u otras imperfecciones.</li> <li>- Se asignó un código de identificación a cada filtro.</li> <li>- Se equilibró cada filtro en el laboratorio, durante un mínimo de 24 horas dentro de desecadores con silica gel</li> <li>- Se pesó cada filtro en una microbalanza o hasta que la diferencia sea menor a 20 mg (Cai <i>et al.</i>, 2017).</li> <li>- Transporte: Los filtros circulares fueron colocados en placas petri de 60 mm y dentro de bolsas tipo ziploc.</li> <li>- Los filtros rectangulares se instalaron en el cassette y se transportaron en el case portafiltro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura media de 20°C a 23°C.</li> <li>- Humedad media de 30% a 40% de humedad relativa.</li> <li>- Se usó guantes de nitrilo para evitar cargas electrostáticas.</li> <li>- Se usó una pinza plana para manipular el papel filtro.</li> <li>- Se usó un cubre boca para no influir en el peso del material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El área elegida para el muestreo fue limpiada cada tres semanas, a fin de evitar contaminación indirecta.</li> <li>- Los equipos muestreadores se limpiaron cada tres semanas para evitar su avería.</li> </ul>

**FUENTE:** Elaboración propia

**Tabla 5: Etapa de muestreo PM<sub>2,5</sub>**

<b>Condiciones del filtro</b>	<b>Condiciones Generales de Campo</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Se instalaron los filtros pre-pesados en su respectivo equipo.</li><li>- Se registró las condiciones del tiempo atmosférico y fecha de muestreo en la cadena de custodia (Anexo 2).</li><li>- Se programó cada equipo para un encendido y apago automático de 24 horas.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Debido a la inestabilidad del flujo eléctrico, se conectaron los equipos a dos estabilizadores de voltaje para evitar daños a los muestreadores.</li></ul>

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 6: Etapa de post-muestreo PM<sub>2,5</sub>**

<b>Condiciones del filtro</b>	<b>Condiciones Generales de Laboratorio</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Se retiraron los portafiltros muestreados y se trasladaron hasta el laboratorio.</li><li>- Se retiraron los filtros muestreados, tocando solo los extremos con la pinza.</li><li>- Inmediatamente después del equilibrio, se pesaron los filtros, registrándose en la Hoja de Datos.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Se equilibraron los filtros bajo las mismas condiciones empleadas antes del muestreo.</li></ul>

FUENTE: Elaboración propia

En el Anexo 2 se muestra la cadena de custodia empleada durante el muestreo del presente trabajo de investigación.

#### c.4) Cálculo de la concentración del material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>)

La concentración del material particulado PM<sub>2,5</sub> se calculó según la ecuación 1 (NTP 900.069. 2017):

$$PM_{2,5} = (W_f - W_i) / V_{a_{std}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

- PM<sub>2,5</sub> : Concentración en masa de PM<sub>2,5</sub>, en µg/m<sup>3</sup>
- W<sub>f</sub>, W<sub>i</sub> : Peso final e inicial respectivamente, del filtro utilizado para la recolección de la muestra de PM<sub>2,5</sub>, en µg
- V<sub>a<sub>std</sub></sub> : Volumen total de aire muestreado estandarizado a una temperatura de 298 Kelvin y a una presión atmosférica de 101,3 kPa (760 mmHg o 1 atm).

Cabe mencionar que para el cálculo de la concentración de PM<sub>2,5</sub> no fue necesario estandarizar el volumen total de aire muestreado respecto a las condiciones de presión y temperatura del día de muestreo. Esto es debido a que los tres equipos tienen sensores internos, que ajustan las condiciones requeridas y muestra el volumen estandarizado.

Como medida de validación de las concentraciones obtenidas se evaluó dos criterios: (i) el estado físico de los filtros, invalidando la muestra cuando se encontraban rotos, deteriorados, manipulados sin los guantes de nitrilo y/o cubreboca. (ii) el tiempo de monitoreo debía encontrarse en intervalo de 24 ± 1 horas.

Asimismo, la USEPA (2016) requiere el uso de filtros “blancos”, con el objetivo de corregir los valores de masa de PM<sub>2,5</sub> debido a la manipulación ya sea en el laboratorio (blancos de laboratorio) y/o en el punto de muestreo (blancos de campo). El tratamiento que se le dio a los filtros blancos se describe a continuación:

**Blancos de Campo:** El filtro fue desecado por 24 horas y pre pesado como cualquier filtro, posteriormente se instaló en los muestreadores sin que estos se enciendan, por un período de tiempo de cinco segundos; luego se volvió a desechar por 24 horas y se pesó, comparándose el peso inicial y final. USEPA (2016) recomienda que por 10 por ciento de filtros totales utilizados se tenga 1 filtro blanco de campo.

**Blancos de Laboratorio:** El filtro fue desecado por 24 horas y pre pesado como cualquier filtro, posteriormente se dejó el filtro y su placa Petri dentro en el laboratorio , por un período de tiempo de 24 horas; luego se volvió a desecar por 24 horas y se pesó, comparándose el peso inicial y final. USEPA (2016) recomienda que el 10 por ciento de filtros totales utilizados sean filtros blancos.

Para la corrección de datos por blancos, se realiza un promedio aritmético de los blancos de laboratorio y un promedio aritmético de los blancos de campo, posterior a ello se realiza una semi suma de los promedios anteriores, el valor obtenido será sumado del valor de la variación de masa obtenida en cada filtro. Asimismo, se eliminaron los valores de concentración de PM<sub>2,5</sub> mayores a 100 µg/m<sup>3</sup> y menores a 2 µg/m<sup>3</sup>, en base a los resultados obtenidos por SENAMHI (2018), la sensibilidad de los equipos muestreadores y la aplicación del método gráfico de diagrama de cajas utilizando la versión de prueba del *software* Minitab 18.

En el Anexo 3, se muestra las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> para los tres muestreadores.

Adicionalmente, de manera simultánea al monitoreo de material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>), se obtuvieron valores diarios de parámetros meteorológicos: temperatura ambiental, presión atmosférica, humedad relativa, precipitación, velocidad y dirección del viento y radiación solar. Estos datos fueron medidos por la estación meteorológica Vantage Pro2 del Laboratorio de Recursos Hídricos de la UNALM.

Una vez determinados los valores de concentración de material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>), se procedió a evaluar los datos obtenidos, como se describe a continuación:

#### **a) Comportamiento horario de la concentración de PM<sub>2,5</sub> en Lima Metropolitana**

En esta parte de la metodología, se analizó la variación de la concentración de PM<sub>2,5</sub> en relación a las horas del día, para ello se usaron los datos validados proporcionados por el monitor continuo de material particulado PM<sub>2,5</sub> ubicado en la Embajada de los Estados Unidos. Cabe mencionar que, se consideró un mínimo de 75 por ciento de datos totales por día para poder procesar la evaluación en un periodo diario; posterior a ello, se agrupó los valores de concentración obtenidos según las horas del día (24 grupos de datos).

Con el objetivo de reforzar el análisis se utilizó un gráfico de barras para hacer notar el patrón de concentraciones de PM<sub>2,5</sub> entre las horas del día.

### **b) Comportamiento diario de la concentración de PM<sub>2,5</sub>**

En esta parte de la metodología se evaluó el comportamiento diario de la concentración de PM<sub>2,5</sub> a nivel de las estaciones de calidad de aire de Lima Este del SENAMHI y del monitor continuo de la Embajada de los Estados Unidos.

Asimismo, se evaluó el comportamiento diario de la concentración de PM<sub>2,5</sub> de los datos obtenidos durante la fase de campo del presente trabajo de investigación.

#### **b.1) Comportamiento diario de la concentración de PM<sub>2,5</sub> en Lima Este**

En esta parte de la metodología, se analizó la variación de la concentración de PM<sub>2,5</sub> con respecto a los días de la semana para el período de diciembre de 2018 a marzo de 2019, para ello se utilizaron datos validados de la red de estaciones automáticas de calidad de aire del SENAMHI ubicadas en la zona Lima Este y del monitor continuo de la Embajada de los Estados Unidos.

Las estaciones automáticas seleccionadas se detallan en la Tabla 7 que se detalla a continuación:

**Tabla 7: Ubicación de estaciones de monitoreo de la calidad del aire**

Código	Nombre de Estación	Coordenadas UTM	
		Este X	Norte Y
<b>Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)</b>			
ATE	Ate	291126	8669830
SJL	San Juan de Lurigancho	282383	8670567
STA	Santa Anita	285389	8667921
<b>Embajada de los Estados Unidos</b>			
USA	Santiago de Surco	285699	8661674

FUENTE: Elaboración propia

Con el objetivo de reforzar el análisis se utilizaron gráficos de barras para hacer notar el patrón de concentraciones de  $PM_{2,5}$  entre los días de la semana.

### **b.2) Comportamiento diario de la concentración de $PM_{2,5}$ en el área de estudio**

En esta parte de la metodología, se dividieron los datos obtenidos por el equipo de referencia Partisol 2000H en función del tipo de filtro utilizado para el (fibra de cuarzo y teflón), en dos etapas; la primera para el periodo del 07 de diciembre de 2018 hasta 29 de enero de 2019 y la segunda para el periodo del 31 de enero de 2019 hasta el 31 de marzo de 2019.

Para determinar el nivel de significancia entre las concentraciones de material particulado fino ( $PM_{2,5}$ ), usando filtros de fibra de cuarzo y los filtros de teflón se utilizó la versión de prueba del software Minitab 18.

Lo primero, fue evaluar la *normalidad* de cada grupo de datos, utilizando la prueba estadística de Anderson-Darling, para determinar si seguían una distribución normal. Segundo, se evaluó la *varianza* de cada grupo a través de la prueba estadística de homogeneidad de varianzas, con el objetivo de verificar si las varianzas eran iguales. Tercero, se determinó si existía *diferencia estadística significativa* entre ambos grupos utilizando: (i) la prueba t en dos muestras, si los dos grupos seguían una distribución normal, o (ii) la prueba no paramétrica U de Mann Whitney, si al menos uno de los grupos no seguía una distribución normal.

Una vez demostrado que no existe diferencia significativa entre ambos grupos de datos, se procedió a agrupar los datos de concentración obtenidos por el muestreador Partisol 2000H, en un solo bloque.

En el Anexo 4, se muestran los cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para esta sección.

Posterior a este análisis, se analizó la variación de la concentración de  $PM_{2,5}$  con respecto a los días de la semana, para cada equipo muestreador. Para el desarrollo estadístico se usó el *software* de prueba Minitab 18.

Como primer paso, se agrupó los valores de concentración obtenidos según los días de la semana (7 grupos de datos). Como segundo paso, se aplicó la prueba de normalidad de Anderson Darling a cada grupo de datos para evaluar si éstos seguían una distribución



normal. Después, se procedió a utilizar la prueba estadística homogeneidad de varianzas con el objetivo de comprobar que las varianzas de los siete grupos sean iguales, utilizando los promedios por día de la semana de cada muestreadores. Luego se aplicó la prueba estadística ANOVA de un solo factor, con la finalidad de determinar si existe diferencia significativa entre los grupos de datos de PM<sub>2,5</sub>, lo cual se logró al evaluar las medias poblacionales, y en consecuencia comprobar si existe una tendencia o patrón de comportamiento en todos los días de la semana. Con el objetivo de reforzar el análisis se utilizaron gráficos de barras para hacer notar el patrón de concentraciones de PM<sub>2,5</sub> entre los días de la semana.

En el Anexo 5, se muestran los cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para esta sección.

### **b.3 Cálculo del Índice de Calidad de Aire (INCA)**

Para esta sección se aplicó el cálculo del INCA establecido mediante R.M. N° 181-2016-MINAM, el cual relaciona la concentración de PM<sub>2,5</sub> y su correspondiente valor en el ECA-Aire (50 µg/m<sup>3</sup>). Se usó la siguiente expresión matemática:

$$I (PM_{2,5}) = [PM_{2,5}] * 100 / 50 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

I: Índice de calidad ambiental

[ ]: Concentración del contaminante

Cada valor calculado del INCA, se relaciona directamente con un rango de valores y un color asignado a su calidad de aire (Tabla 3) y fue representado en un gráfico de barras.

### **c) Comportamiento mensual de la concentración de PM<sub>2,5</sub>**

En esta parte de la metodología se evaluó el comportamiento mensual de la concentración de PM<sub>2,5</sub> a nivel de las estaciones de calidad de aire de Lima Este del SENAMHI y del monitor continuo de la Embajada de los Estados Unidos.

Asimismo, se evaluó el comportamiento mensual de la concentración de PM<sub>2,5</sub> de los datos obtenidos durante la fase de campo del presente trabajo de investigación. Luego se determinó el Índice de Calidad de Aire (INCA).

### **c.1) Comportamiento mensual de la concentración de PM<sub>2,5</sub> en Lima Este**

En esta parte de la metodología, se analizó la variación mensual de la concentración de PM<sub>2,5</sub> para el período de diciembre de 2018 a marzo de 2019, para ello se utilizaron datos validados de la red de estaciones automáticas de calidad de aire del SENAMHI y del monitor de la Embajada de los Estados Unidos.

Con el objetivo de reforzar el análisis se utilizaron gráficos de barras para hacer notar el patrón de concentraciones de PM<sub>2,5</sub> entre los días de la semana.

### **c.2) Comportamiento mensual de la concentración de PM<sub>2,5</sub> en el área de estudio**

En esta parte de la metodología, se analizó la variación de la concentración de PM<sub>2,5</sub> con respecto a los meses de muestreo para el período diciembre a marzo, para cada equipo muestreador. Para el desarrollo estadístico se usó el *software* de prueba Minitab 18.

Como primer paso, se agrupó los valores de concentración obtenidos según los meses muestreados (4 grupos de datos). Como segundo paso, se aplicó la prueba de normalidad de Anderson Darling a cada grupo de datos para evaluar si éstos seguían una distribución normal. Después, se procedió a utilizar la prueba estadística homogeneidad de varianzas con el objetivo de comprobar que las varianzas de los cuatro grupos sean iguales. Finalmente se aplicó la prueba estadística ANOVA de un solo factor, con la finalidad de determinar si existe diferencia significativa entre los grupos de datos de PM<sub>2,5</sub>, lo cual se logró al evaluar las medias poblacionales, y en consecuencia comprobar si existe una tendencia o patrón de comportamiento en todos meses de muestreo. Con el objetivo de reforzar el análisis se utilizaron gráficos de líneas de tendencia para hacer notar el patrón de concentraciones de PM<sub>2,5</sub> entre los meses analizados.

En el Anexo 6, se muestran los cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para esta sección.

### 3.6.2 Relación entre las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> y las variables meteorológicas

En este punto de la metodología se procedió a evaluar la relación entre los datos de material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) obtenidos en campo y los valores de las variables meteorológicas temperatura ambiental, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar; datos obtenidos por la estación meteorológica automática del Laboratorio de Recursos Hídricos, ubicada a la misma altura que el área de estudio, dentro del campus de la UNALM.

Para determinar si existe relación y determinar el nivel de esta entre los valores de concentración PM<sub>2,5</sub> y los valores de las variables meteorológicas mencionadas, medidas durante el periodo de monitoreo, se utilizó la versión de prueba del *software* estadístico Minitab 18.

Lo primero, se aplicó la prueba de normalidad de Anderson Darling con los datos de concentración de PM<sub>2,5</sub> y los datos de temperatura ambiental, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, con el objetivo de determinar si tenían distribución normal. Segundo, se aplicó la prueba estadística no paramétrica Correlación de Spearman para determinar el nivel de relación existente entre la concentración de PM<sub>2,5</sub> y las variables meteorológicas. Esta prueba no paramétrica también se indicó si los coeficientes de correlación determinados, son significativos o no. Para el caso donde el parámetro meteorológico tenga una distribución normal se aplicó la prueba estadística paramétrica Correlación de Pearson.

Finalmente se evaluó la influencia de todas las variables meteorológicas agrupadas para cada muestreador mediante un análisis de regresión lineal múltiple utilizando el *software* estadístico Minitab. Se determinó que el modelo de regresión es significativo cuando el valor estadístico P fuese menor a 0,05.

En el Anexo 7, se muestran los cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para esta sección.

### **3.6.3 Relación entre la metodología gravimétrica de alto volumen (Hivol – 3000) y la metodología gravimétrica de bajo volumen (Partisol 2000H), y determinación de ecuaciones de corrección**

En este punto de la metodología, se comparó los valores de concentración de  $PM_{2.5}$  utilizando el muestreador Hivol – 3000 y los del Partisol 2000H, evaluándose la correlación y regresión lineal existente entre ambos grupos.

Como primer paso, se aplicó el test de Ryan Joiner para evaluar la normalidad de los datos obtenidos en cada muestreador, se consideró un p valor de 0,05. Posteriormente, para determinar si verdaderamente existe regresión lineal entre las concentraciones obtenidas con el par de metodologías que se analizaron se aplicó la prueba estadística F.

El planteamiento de las hipótesis es el siguiente:

$H_0$ : No existe regresión lineal entre las concentraciones de material particulado observadas con ambas metodologías.

$H_1$ : Si existe regresión lineal entre las concentraciones de material particulado observadas con ambas metodologías.

Se rechaza  $H_0$  si el p valor es menor a 0,05 a un nivel de significancia  $\alpha = 5$  por ciento, lo cual significa que si existe una regresión lineal entre las metodologías evaluadas.

Para evaluar los factores de corrección entre la metodología gravimétrica del muestreador Hivol - 3000 y la metodología gravimétrica del muestreador Partisol 2000H, se aplicó el modelo de regresión lineal simple al periodo total de muestreo; asimismo, se agrupó los valores de concentración en periodos mensuales de muestreo dentro del periodo total. Asimismo, para evaluar la posibilidad de homogenizar las ecuaciones mensuales halladas en una sola, se analizó si cada una de las concentraciones corregidas, por todas ecuaciones halladas en el periodo total no difieran en más del 10 por ciento entre la menor concentración corregida y la mayor concentración corregida obtenidas para un mismo día durante el periodo determinado.

Finalmente se evaluó la influencia de las variables meteorológicas junto a la concentración de  $PM_{2.5}$  usando el muestreador Hivol - 3000, utilizando el modelo de regresión lineal múltiple. En el Anexo 8, se muestran los cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para esta sección.

### **3.6.4 Relación entre la metodología gravimétrica de bajo volumen (Microvol – 1100) y la metodología gravimétrica de bajo volumen (Partisol 2000H), y determinación de ecuaciones de corrección**

En este punto de la metodología, se comparó los valores de concentración de  $PM_{2.5}$  utilizando el muestreador Microvol - 1100 y los del Partisol 2000H, evaluándose la correlación y regresión lineal existente entre ambos grupos.

Como primer paso, se aplicó el test de Ryan Joiner para evaluar la normalidad de los datos obtenidos en cada muestreador, se consideró un p valor de 0,05. Posteriormente, para determinar si verdaderamente existe regresión lineal entre las concentraciones obtenidas con el par de metodologías que se analizaron se aplicó la prueba estadística F.

El planteamiento de las hipótesis es el siguiente:

$H_0$ : No existe regresión lineal entre las concentraciones de material particulado observadas con ambas metodologías.

$H_1$ : Si existe regresión lineal entre las concentraciones de material particulado observadas con ambas metodologías.

Se rechaza  $H_0$  si el p valor es menor a 0,05 a un nivel de significancia  $\alpha = 5$  por ciento, lo cual significa que si existe una regresión lineal entre las metodologías evaluadas.

Para evaluar los factores de corrección entre la metodología gravimétrica del muestreador Microvol - 1100 y la metodología gravimétrica del muestreador Partisol 2000H, se aplicó el modelo de regresión lineal simple al periodo total de muestreo; asimismo, se agrupó los valores de concentración en periodos mensuales de muestreo dentro del periodo total. Asimismo, para evaluar la posibilidad de homogenizar las ecuaciones mensuales halladas en una sola, se analizó si cada una de las concentraciones corregidas, por todas ecuaciones halladas en el periodo total no difieran en más del 10 por ciento entre la menor concentración corregida y la mayor concentración corregida obtenidas para un mismo día durante el periodo determinado.

Finalmente se evaluó la influencia de las variables meteorológicas junto a la concentración de  $PM_{2.5}$  usando el muestreador Microvol - 1100, utilizando el modelo de regresión lineal múltiple. En el Anexo 9, se muestran los cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para esta sección.

### **3.6.5 Análisis del costo económico para el muestreo de material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>)**

Para alcanzar el quinto objetivo específico, se procedió como se indica a continuación:

Se solicitaron cotizaciones económicas para la compra de equipos que midan el parámetro de calidad de aire PM<sub>2,5</sub>, para ello se consideraron los muestreadores utilizados para el presente trabajo. Asimismo, se solicitaron cotizaciones para adquirir los consumibles necesarios para coleccionar las muestras respectivas.

En el Anexo 10, se muestran las cotizaciones económicas realizadas para esta sección.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 Variación temporal de la concentración de PM<sub>2,5</sub> en el aire**

Para el presente trabajo de investigación se utilizaron una base de datos de promedios horarios, diarios y mensuales de material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) medidos en la red de calidad del aire del SENAMHI para Lima Este, así como por el monitor continuo de material particulado PM<sub>2,5</sub> ubicado en la Embajada de los Estados Unidos, distrito de Santiago de Surco; para el período de diciembre de 2018 a marzo de 2019.

Asimismo, se utilizaron los resultados obtenidos para PM<sub>2,5</sub> medidos en la azotea del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria La Molina, para el período de diciembre de 2018 a marzo de 2019.

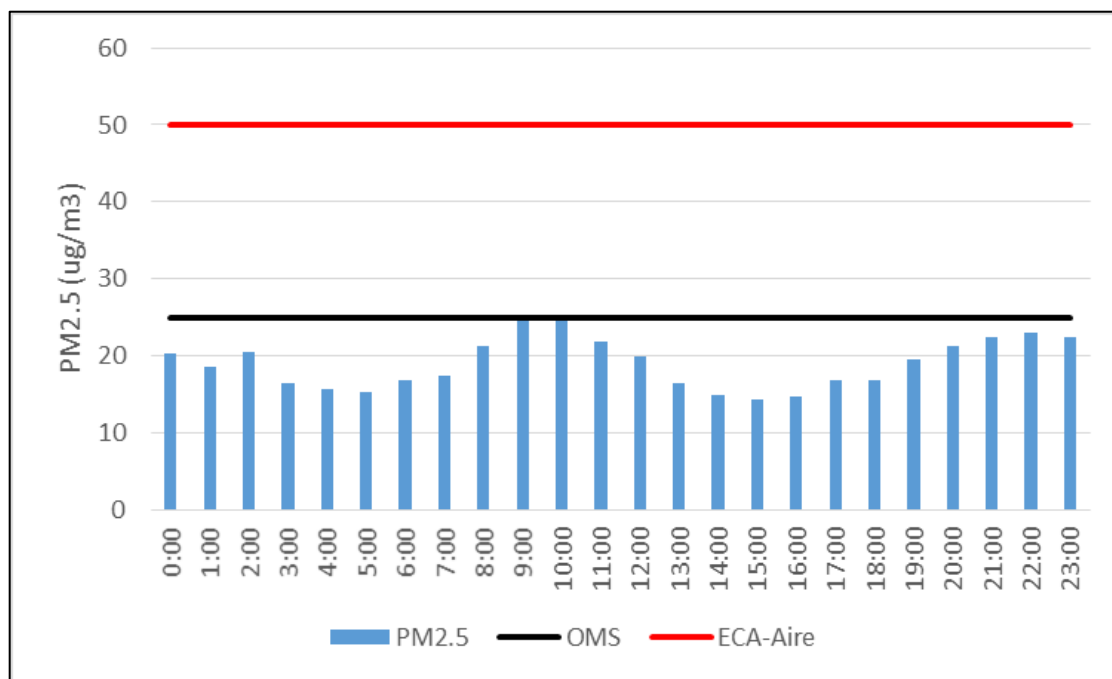
#### **4.1.1 Comportamiento horario de la concentración de PM<sub>2,5</sub> en Lima Metropolitana**

Para la variación del comportamiento horario de la concentración de PM<sub>2,5</sub>; se evaluaron los datos obtenidos en la estación de la Embajada de los Estados Unidos, ubicada en el distrito de Santiago de Surco, para el período de diciembre de 2018 a marzo de 2019.

La Figura 10 muestra la variación promedio horaria de la concentración de PM<sub>2,5</sub> hallada con el monitor continuo de material particulado PM<sub>2,5</sub> ubicado en la Embajada de los Estados Unidos para el periodo de muestreo del presente estudio, desde diciembre de 2018 hasta marzo de 2019.

Como se puede observar en la Figura 10, existen dos valores máximos a lo largo de las 24 horas del día. El primer máximo se observa a las 10 horas (alcanzando un valor máximo de 25,14  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y el segundo se da a las 22 horas (alcanzando un valor máximo de 22,91  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), los cuales se pueden explicar debido al alto nivel de tráfico vehicular que se presenta en la zona, generado por el ingreso a la jornada laboral entre las 7 horas y 10 horas, para el primer máximo y la salida de la jornada laboral a partir de las 19 horas, para el segundo máximo. Es preciso mencionar que, para el área metropolitana de Lima y Callao se cuentan

con 2,2 millones de vehículos motorizados lo que equivale a un total de 9 millones de viajes por día (Alarcón *et al.*, 2014), los que coinciden con los valores pico observados en la mañana y en la tarde.



**Figura 10:** Variación horaria del PM<sub>2,5</sub> en la Embajada de los Estados Unidos para el periodo diciembre 2018 a marzo 2019

FUENTE: Elaboración propia

Se observa que los valores de material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) en la Embajada de los Estados Unidos, en general, no superan de manera *referencial* los valores establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental para Aire (50 µg/m<sup>3</sup>) ni los valores que establece la Guía de la OMS diario (25 µg/m<sup>3</sup>). Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (Ibáñez, 2008; Pacsi, 2016; Ordóñez-Aquino *et al.*, 2016; Leiva-Guzmán *et al.*, 2017).

#### 4.1.2 Comportamiento diario de la concentración de PM<sub>2,5</sub>

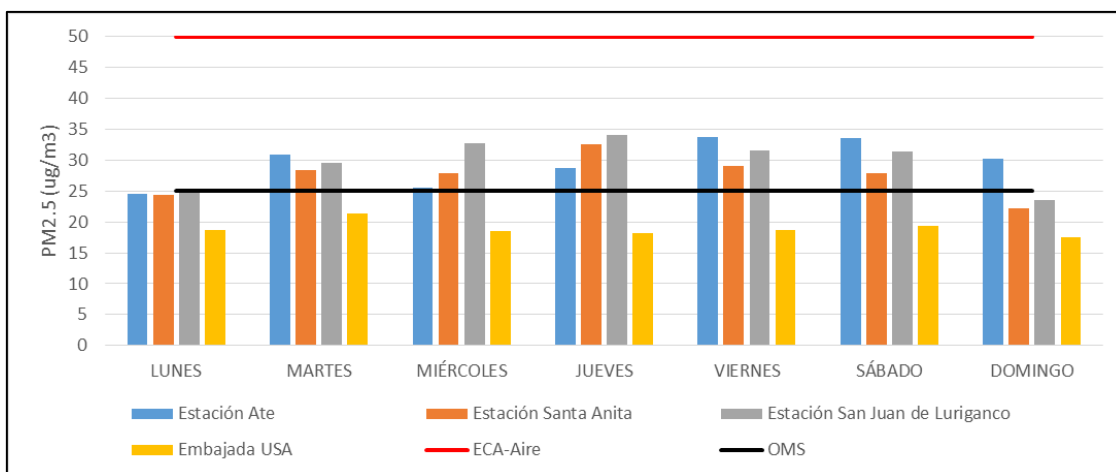
Para el caso de la variación diaria en la concentración de PM<sub>2,5</sub> para ciclos semanales, se evaluaron los datos obtenidos en las estaciones de SENAMHI ubicadas en Lima Este, en la Embajada de los Estados Unidos (Santiago de Surco) y los datos obtenidos en la presente



investigación en la azotea del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria La Molina, para el período de diciembre de 2018 a marzo de 2019.

### a. Comportamiento diario de la concentración de PM<sub>2,5</sub> en Lima Este

La Figura 11 muestra la variación diaria promedio de concentración de PM<sub>2,5</sub> por ciclos semanales, mismos que fueron evaluados por las estaciones de calidad de aire del SENAMHI (estaciones Ate, Santa Anita y San Juan de Lurigancho) y por el monitor automático para material particulado fino ubicado en la Embajada de los Estados Unidos, para el período de diciembre de 2018 a marzo de 2019. Cabe mencionar que, debido a que la estación de calidad de aire del SENAMHI ubicada en Huachipa no registró valores para el material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) no se tomó en cuenta en el presente trabajo.



**Figura 11:** Variación diaria de concentración del PM<sub>2,5</sub> en Lima Este para las estaciones de SENAMHI y la Embajada de los Estados Unidos, durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019

FUENTE: Elaboración propia

De la Figura 11 se observa que los mayores valores de concentración promedio de PM<sub>2,5</sub> se registran durante los días martes y viernes para las estaciones de Ate y Santa Anita; con valores de 30,94 µg/m<sup>3</sup> y 33,81 µg/m<sup>3</sup> para la estación de Ate y 28,42 µg/m<sup>3</sup> y 29,01 µg/m<sup>3</sup> para la estación Santa Anita. Asimismo, la concentración mínima de PM<sub>2,5</sub> se registra los días domingo y lunes alcanzando valores de 24,61 µg/m<sup>3</sup> para la estación Ate y 22,16 µg/m<sup>3</sup> para la estación Santa Anita.

Por otro lado, para la estación San Juan de Lurigancho se registran los máximos picos de concentración los días miércoles y jueves con valores de  $32,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $34,07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. Asimismo, la concentración mínima se registra el día domingo con un valor de  $23,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

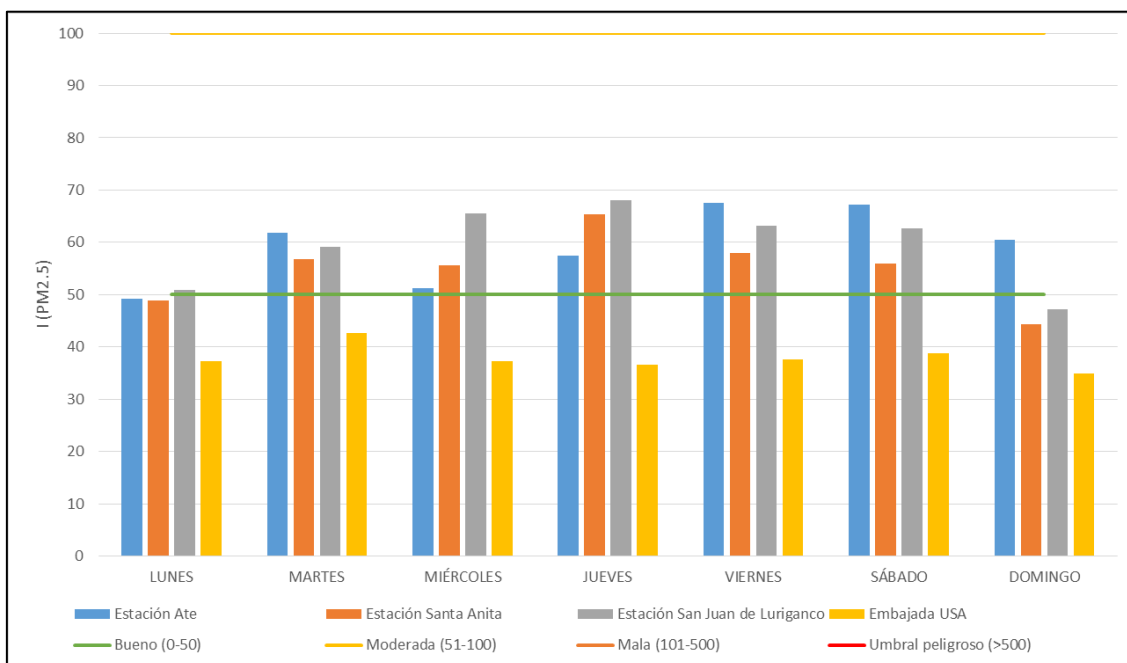
En el caso del monitor ubicado en la Embajada de los Estados Unidos (Santiago de Surco), los máximos picos de concentración se registran los días martes y sábado con valores de  $21,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $19,39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. Asimismo, la concentración mínima se registra el día domingo con un valor de  $17,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En base a los datos diario semanales promedio de concentración de  $\text{PM}_{2,5}$  se muestra que los picos de concentración en Lima Este y Santiago de Surco se presentan de martes a sábado, lo que se puede relacionar a patrones de uso y costumbres de la población ubicadas en la zona de análisis. Por otro lado, el hecho de que los valores mínimos de concentración se registren los días domingo es coherente con los hábitos de descanso de la población, misma que disminuye su actividad antropogénica y por ende el tránsito vehicular. Estos resultados son consistentes con los obtenidos en otras investigaciones (Ibáñez, 2008; Pacsi, 2016; Ordóñez-Aquino *et al.*, 2016; Leiva-Guzmán *et al.*, 2017)

En relación a los Estándares de Calidad Ambiental para Aire (ECA-Aire) se observa que para el parámetro  $\text{PM}_{2,5}$  no se superó el valor límite de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para ninguna estación de Lima Este así como tampoco para el monitor de la Embajada de los Estados Unidos. Adicionalmente; se precisa que para el valor guía establecido por la Organización Mundial de la Salud para concentraciones diarias de  $\text{PM}_{2,5}$  ( $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), las estaciones de Ate, Santa Anita y San Juan de Lurigancho superaron el nivel de concentración de martes a sábado, mientras que para la Embajada de los Estados Unidos no se superó dicho valor en ningún día de la semana.

En la Figura 12 se evalúa el Índice de Calidad de Aire (INCA) para las estaciones de SENAMHI ubicadas en Lima Este así como del monitor continuo de la Embajada de los Estados Unidos (Santiago de Surco), para el periodo de estudio de diciembre de 2018 a marzo de 2019. Se puede observar que para las estaciones que superaron los valores guía de la Organización Mundial de la Salud durante los días martes a sábado la calidad del aire es moderada lo cual quiere decir que se pueden realizar actividades en ambientes exteriores con algunas limitaciones para la población sensible como son los niños, las personas de la tercera edad, madres gestantes, etc. Por otro lado, y como se observó en la Figura 11, la calidad del

aire en la Embajada de los Estados Unidos es buena dado que su INCA para todos los días de la semana es inferior a 50, lo que implica que se pueden realizar actividades en ambientes exteriores sin ningún riesgo en la salud de la población.



**Figura 12:** Variación diaria del Índice de Calidad del Aire (INCA) en Lima Este para las estaciones de SENAMHI y la Embajada de los Estados Unidos, durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019

FUENTE: Elaboración propia

### b. Comportamiento diario de la concentración de PM<sub>2,5</sub> en el área de estudio

Como se describe en la metodología, para el presente trabajo de investigación se utilizaron tres muestreadores de PM<sub>2,5</sub> ubicados en la azotea del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria La Molina, durante el periodo de diciembre de 2018 a marzo de 2019.

La Tabla 8 muestra los estadísticos descriptivos de las concentraciones promedio validadas de PM<sub>2,5</sub> para los muestreados empleados en el presente trabajo. Se observa respecto a las medias que, el mayor valor de concentración lo obtiene el equipo Hivol - 3000 y el menor valor de concentración se registra para el equipo Microvol - 1100. Asimismo, del análisis

del coeficiente de variabilidad se observa que el equipo Hivol – 3000 presenta datos más homogéneos con un valor de 0,155 respecto al Microvol – 1100 con un valor de 0,258.

**Tabla 8: Estadísticos descriptivos de las concentraciones promedio de PM<sub>2,5</sub> obtenidas con los muestreadores Hivol – 3000, Microvol – 1100 y Partisol 2000H, para el periodo de muestreo**

Muestreador	Número		PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )				ECA (µg/m <sup>3</sup> )
	de muestras	Media	Desviación Estándar	Coef. Variab.	Min	Máx	
Microvol– 1100	30	19,910	5,144	0,258	12,528	30,874	
Partisol 2000H	43	28,571	5,342	0,187	20,006	43,924	50
Hivol-3000	41	40,218	6,247	0,155	25,434	54,958	

FUENTE: Elaboración propia

Para poder alcanzar el objetivo de evaluar la variación diaria de PM<sub>2,5</sub> por ciclos semanales, durante el periodo de muestreo, primero se evaluó los datos generados en el equipo Partisol y posteriormente se evaluó los valores de concentración por día de la semana obtenidos por cada muestreador.

Como primero paso, y con el fin de evaluar el efecto del material del papel filtro en la determinación de la concentración de PM<sub>2,5</sub>, usando el muestreador Partisol 2000H; se realizó el muestreo con dos tipos de filtros de distinto material: fibra de cuarzo y teflón. Para ello, se evaluó estadísticamente los valores obtenidos de PM<sub>2,5</sub> a través de pruebas de normalidad, homogeneidad de varianza y pruebas de significancia.

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos al aplicar la prueba estadística de normalidad de Anderson Darling a los datos de concentración de PM<sub>2,5</sub> agrupados en dos periodos por tipo de filtro, para el primer grupo se empleó filtros de fibra de cuarzo desde el 07 de diciembre de 2018 hasta el 29 de enero de 2019 mientras que para el segundo grupo se empleó filtros de teflón desde el 31 de enero de 2019 hasta el 31 de marzo de 2019. Es preciso mencionar que, la información fue procesada en la versión de prueba del *software* estadístico Minitab 18.

Como se observa en la Tabla 9, el grupo de datos de concentración obtenidos con filtros de fibra de cuarzo presentan un p valor de 0,223 mientras que el grupo de datos de concentración obtenidos con los filtros de teflón presentan un p valor de 0,407, ambos valores son mayores al nivel de significancia ( $\alpha = 0,05$ ). Por lo tanto, según la Tabla 9, los grupos de datos de concentración de  $PM_{2,5}$  obtenidos con filtros de fibra de cuarzo y teflón siguen una distribución normal.

**Tabla 9: Resultados de la prueba estadística Anderson Darling aplicada a los grupos de datos de concentración de  $PM_{2,5}$  obtenidos en el muestreador Partisol 2000H, para diciembre 2018 – marzo 2019**

<b>Tipo de material del filtro</b>	<b>Número de datos</b>	<b>Anderson Darling</b>	<b>p-valor</b>
Fibra de cuarzo	21	0,469	0,223
Teflón	22	0,364	0,407

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 10: Valores p resultantes de la aplicación de las pruebas estadísticas homogeneidad de varianzas y t en dos muestras**

<b>Tipo del material del filtro</b>	<b>Pruebas Estadísticas</b>	
	<b>Homogeneidad de Varianzas</b>	<b>Prueba t en dos muestras</b>
	<b>valor p</b>	<b>valor p</b>
Fibra de cuarzo y Teflón	0,279	0,083

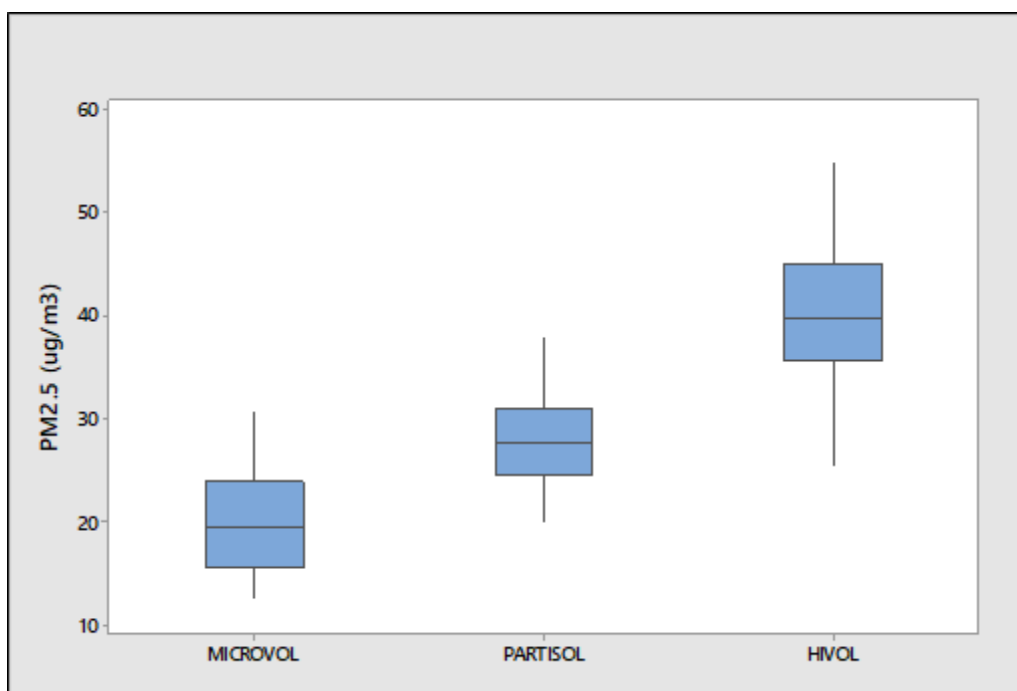
FUENTE: Elaboración propia

La Tabla 10 muestra los resultados de homogeneidad de varianza aplicados a los grupos de concentración de  $PM_{2,5}$  obtenidos usando filtros de fibra de cuarzo y teflón, para ello se usó la prueba estadística de Levene obteniéndose un p valor de 0,279 el cual es mayor al nivel de significancia ( $\alpha = 0,05$ ); por lo tanto, se puede decir que existe homogeneidad de varianzas entre los grupos de datos de concentración de  $PM_{2,5}$  obtenidos con filtros de fibra de cuarzo y teflón.

Una vez determinado que se cumplen los requisitos (distribución de datos normal y homogeneidad de varianzas para los dos grupos de concentración de  $PM_{2,5}$ ) se utilizó la prueba t en dos muestras para evaluar la media de ambos grupos de datos y así evaluar si

existe una diferencia significativa entre los valores obtenidos usando filtros de fibra de cuarzo y filtros de teflón. Así la Tabla 10 muestra que no existe evidencia estadística suficiente para decir que las medias poblacionales del grupo de concentraciones de cuarzo y teflón son diferentes (p valor de 0,083 superior al nivel de significancia), por lo que es posible decir que los valores de concentración de  $PM_{2,5}$  no cambiaron significativamente durante el periodo de muestreo. Los resultados obtenidos se pueden explicar debido a que ambos grupos de  $PM_{2,5}$  se obtuvieron durante la misma estación del año (verano austral).

El detalle de los cálculos estadísticos obtenidos en esta sección se encuentra en el Anexo 4.



**Figura 13:** Diagrama de caja de las concentraciones de  $PM_{2,5}$  obtenidas con los tres equipos muestreadores: Hivol, Microvol y Partisol; considerando los datos validados, para el periodo de muestreo

**FUENTE:** Elaboración propia

Una vez determinado que no existe diferencia significativa entre los datos de  $PM_{2,5}$  obtenidos por el muestreador Partisol 2000H se agrupó los valores obtenidos en un solo bloque, luego se procedió a evaluar gráficamente, utilizando un diagrama de cajas, dichos datos junto a los valores obtenidos con los muestreadores Hivol – 3000 y Microvol – 1100, lo cual se muestra en la Figura 13, donde se observa que los mayores valores de concentración de  $PM_{2,5}$  se registran para el equipo Hivol – 3000 mientras que los menores valores se registran para el equipo Microvol – 1100, lo cual concuerda con lo hallado en la Tabla 8.

Como segundo paso, se agrupó los valores de concentración de  $PM_{2,5}$  obtenidos por cada muestreador por día de la semana (siete grupos por equipo), luego se aplicó la prueba estadística de Anderson Darling para evaluar la normalidad de cada grupo de datos, para ello se aplicó el *software* de prueba Minitab 18. Para el muestreador Microvol – 1100, se obtuvo que para los días de martes a domingo los valores promedio diarios por ciclo semanal siguen una distribución normal, con los siguientes p valor: martes 0,142; miércoles 0,227; jueves 0,867; viernes 0,634; sábado 0,743; domingo 0,631. Es preciso mencionar que por diferentes problemas el muestreo con el equipo Microvol – 1100 para los días lunes no registró el mínimo de muestras necesarias por la prueba de normalidad por lo que no se pudo evaluar su distribución. Para el muestreador Partisol 2000H, se obtuvo que para todos los días de la semana los valores promedio diarios por ciclo semanal siguen una distribución normal, con los siguientes p valor: lunes 0,349; martes 0,081; miércoles 0,646; jueves 0,893; viernes 0,078; sábado 0,075; domingo 0,567. Finalmente para el muestreador Hivol – 3000, se obtuvo que para todos los días de la semana los valores promedio diarios por ciclo semanal siguen una distribución normal, con los siguientes p valor: lunes 0,536; martes 0,103; miércoles 0,447; jueves 0,465; viernes 0,531; sábado 0,383; domingo 0,279.

Posterior a evaluar la normalidad de los datos de  $PM_{2,5}$ , se analizó la homogeneidad de varianzas de los tres grupos de concentración diaria promedio por ciclo semanal, para ello se aplicó la prueba de Levene a través del *software* de prueba Minitab 18. Para el muestreador Microvol – 1100, se obtuvo un p valor de 0,919 el cual es mayor al nivel de significancia ( $\alpha = 0,05$ ); por lo tanto, se puede decir que existe homogeneidad de varianzas entre los valores de concentración por día de la semana obtenidos con el equipo Microvol – 1100. Para el muestreador Partisol 2000H, se obtuvo un p valor de 0,693 el cual es mayor al nivel de significancia ( $\alpha = 0,05$ ); por lo tanto, se puede decir que existe homogeneidad de varianzas entre los valores de concentración por día de la semana obtenidos con el equipo Partisol 2000H. Para el muestreador Hivol – 3000, se obtuvo un p valor de 0,818 el cual es mayor al nivel de significancia ( $\alpha = 0,05$ ); por lo tanto, se puede decir que existe homogeneidad de varianzas entre los valores de concentración por día de la semana obtenidos con el equipo Hivol - 3000.

Para determinar si existe diferencia significativa entre los tres grupos de concentración de  $PM_{2,5}$  durante el periodo de muestreo se aplicó la prueba ANOVA de un solo factor para cada muestreador, lo cual se muestra en la Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13.

**Tabla 11:** Resultado de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de PM<sub>2,5</sub> obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo; para el muestreador Microvol – 1100

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajustado</b>	<b>MC Ajustado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Factor</b>	6	51,67	8,611	0,28	0,942
<b>Error</b>	23	715,75	31,119		
<b>Total</b>	29	767,42			

FUENTE: Elaboración propia

Así, la Tabla 11 muestra los resultados de aplicar la prueba ANOVA de un solo factor sobre los grupos obtenidos de agrupar datos de concentración de PM<sub>2,5</sub> por día de la semana para el equipo Microvol - 1100, en concordancia con las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianza, demuestra que existe evidencia estadística suficiente para decir que las medias poblaciones de dichos grupos no son diferentes ya que el p valor obtenido (0,942) es mayor al nivel de significancia ( $\alpha=0,05$ ). Por lo tanto se puede decir, estadísticamente, que entre los grupos de datos de concentración de PM<sub>2,5</sub> del día lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, no haya diferencia significativa; es decir, la concentración de PM<sub>2,5</sub> fue similar en todos los días de la semana.

**Tabla 12:** Resultado de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de PM<sub>2,5</sub> obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo; para el muestreador Partisol 2000H

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajustado</b>	<b>MC Ajustado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Factor</b>	6	103,1	17,18	0,56	0,756
<b>Error</b>	36	1095,6	30,43		
<b>Total</b>	42	1198,7			

FUENTE: Elaboración propia

La Tabla 12 muestra los resultados de aplicar la prueba ANOVA de un solo factor sobre los grupos obtenidos de agrupar datos de concentración de PM<sub>2,5</sub> por día de la semana para el equipo Partisol 2000H, en concordancia con las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianza, demuestra que existe evidencia estadística suficiente para decir que las medias poblaciones de dichos grupos no son diferentes ya que el p valor obtenido (0,756) es mayor



al nivel de significancia ( $\alpha=0,05$ ). Por lo tanto, se puede decir, estadísticamente, que entre los grupos de datos de concentración de  $PM_{2,5}$  del día lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, no haya diferencia significativa; es decir, la concentración de  $PM_{2,5}$  fue similar en todos los días de la semana.

**Tabla 13:** Resultado de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de  $PM_{2,5}$  obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo; para el muestreador Hivol - 3000

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajustado</b>	<b>MC Ajustado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Factor</b>	6	146,5	24,42	0,59	0,738
<b>Error</b>	34	1414,4	41,6		
<b>Total</b>	40	1560,9			

FUENTE: Elaboración propia

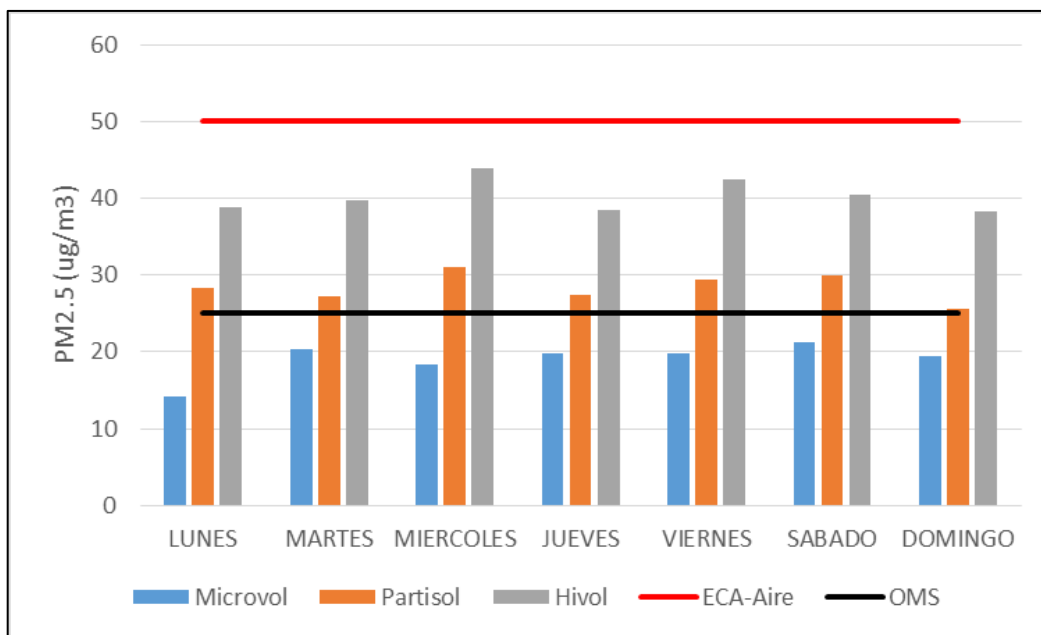
La Tabla 13 muestra los resultados de aplicar la prueba ANOVA de un solo factor sobre los grupos obtenidos de agrupar datos de concentración de  $PM_{2,5}$  por día de la semana para el equipo Hivol - 3000, en concordancia con las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianza, demuestra que existe evidencia estadística suficiente para decir que las medias poblaciones de dichos grupos no son diferentes ya que el p valor obtenido (0,738) es mayor al nivel de significancia ( $\alpha=0,05$ ). Por lo tanto se puede decir, estadísticamente, que entre los grupos de datos de concentración de  $PM_{2,5}$  del día lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, no haya diferencia significativa; es decir, la concentración de  $PM_{2,5}$  fue similar en todos los días de la semana.

El detalle de los cálculos estadísticos obtenidos en esta sección se encuentra en el Anexo 5.

La Figura 14 parece reforzar la idea antes expuesta para cada muestreador, pues se observa que las tendencias de concentración de  $PM_{2,5}$  no siguen los mismos patrones de aumento y disminución en relación a los días de la semana.

Adicionalmente, de la Figura 14 se observa que los picos de concentración promedio de  $PM_{2,5}$  se registran durante los días martes a sábado, para el caso del Microvol – 1100 los valores máximos se registran los días martes y sábado con  $20,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $21,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente; asimismo, para el caso del Partisol 2000H los valores máximos se registran los días miércoles y sábado con  $31,09 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $29,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente; finalmente,

para el caso del Hivol - 3000 los valores máximos se registran los días miércoles y sábado con  $43,90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $42,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. Por otro lado, los valores mínimos de concentración se registran los días domingo para los tres equipos: Microvol – 1100 ( $19,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Partisol 2000H ( $25,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y Hivol – 3000 ( $38,29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

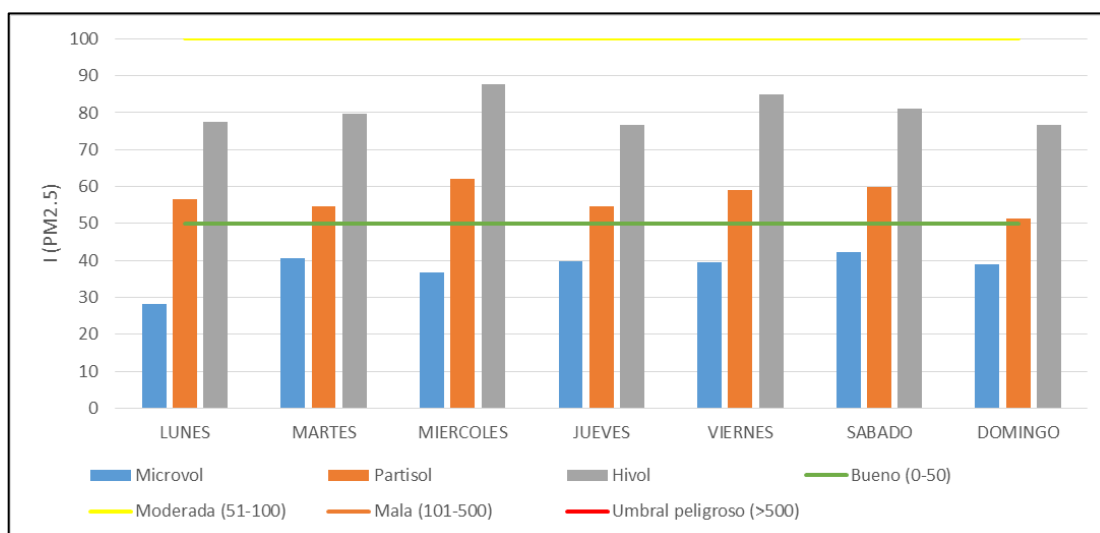


**Figura 14:** Variación diaria de la concentración del  $\text{PM}_{2,5}$  en la zona de estudio utilizando los muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000; durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019

**FUENTE:** Elaboración propia

Los resultados de concentración de  $\text{PM}_{2,5}$  obtenidos en la presente investigación son coherentes y similares a los resultados encontrados por Ibáñez (2008), Benítez *et al.* (2010), Pacsi (2016) y Leiva-Guzmán *et al.* (2017), quienes evaluaron la variación diaria del  $\text{PM}_{2,5}$  en El Agustino (Lima, Perú), Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia) y Lima metropolitana, respectivamente. Estos estudios demostraron que, respecto a los días de la semana, existe una evidente tendencia de aumento en la concentración del  $\text{PM}_{2,5}$  de lunes a sábado asociado a una mayor actividad antropogénica y por ende un mayor tránsito vehicular. Por otro lado, estos autores destacan que para los días domingo se observa una disminución en la concentración del material particulado fino ( $\text{PM}_{2,5}$ ) asociada a que la población disminuye sus actividades cotidianas (costumbres y patrones de uso) y por ende disminuye el tránsito vehicular, tal como lo menciona Pacsi (2016) en su investigación.

En relación a los Estándares de Calidad Ambiental para Aire (ECA-Aire) se observa que para el parámetro  $PM_{2.5}$  no se superó el valor límite de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para ningún equipo muestreador empleado en el presente trabajo. Sin embargo, se precisa que para el valor guía establecido por la Organización Mundial de la Salud para concentraciones diarias de  $PM_{2.5}$  ( $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), los equipos Partisol 2000H y Hivol – 3000, superaron el nivel de concentración durante todos los días de la semana, mientras que para el equipo Microvol - 1100 no se superó dicho valor en ningún día de la semana. Esto significa que para el periodo de muestreo, el muestreador Microvol – 1100 subvalora la concentración de  $PM_{2.5}$  mientras que el equipo Hivol – 3000 sobrevalora la concentración de  $PM_{2.5}$  respecto al equipo Partisol 2000H que como se sabe es el equipo recomendado por la USEPA (2019) para evaluar la calidad de aire en relación al parámetro de estudio.



**Figura 15:** Variación diaria del Índice de Calidad del Aire (INCA) para  $PM_{2.5}$  en la zona de estudio utilizando los muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000; durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019, durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019

FUENTE: Elaboración propia

Lo mencionado en el párrafo anterior se evidencia en la Figura 15, la cual muestra la variación diaria del Índice de calidad de Aire (INCA) para  $PM_{2.5}$  en la zona de estudio con los equipos muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000. Como se observa según el INCA asociado al equipo Microvol – 1100 la calidad del aire en el campus

de la UNALM y sus alrededores es buena; sin embargo, para el caso de los equipos Partisol 2000H y Hivol – 3000, la calidad del aire en el campus de la UNALM y sus alrededores es moderada lo cual restringiría ciertas actividades al aire libre en la población circundante sensible a la exposición del PM<sub>2,5</sub> como son los niños, las personas de la tercera edad, personas con enfermedades respiratorias crónicas y cardiovasculares y madres gestantes.

#### **4.1.3 Comportamiento mensual de la concentración de PM<sub>2,5</sub>**

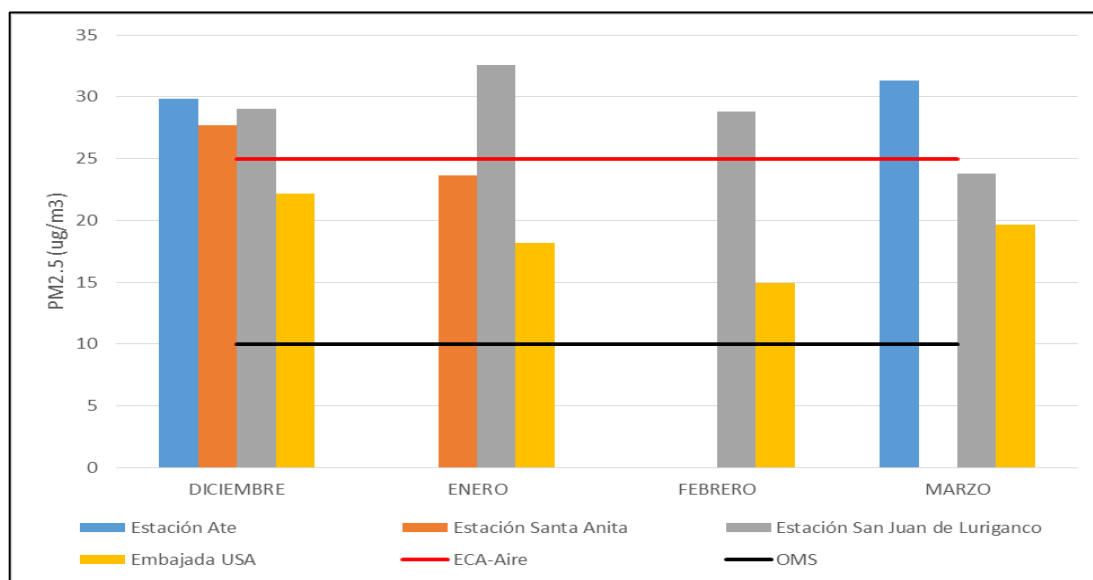
Para el caso de la variación mensual en la concentración de PM<sub>2,5</sub>, se evaluaron los datos obtenidos en las estaciones de SENAMHI ubicadas en Lima Este, en la Embajada de los Estados Unidos (Santiago de Surco) y los datos obtenidos en la presente investigación en la azotea del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria La Molina, para el período de diciembre de 2018 a marzo de 2019.

##### **a. Comportamiento mensual de la concentración de PM<sub>2,5</sub> en Lima Este**

La Figura 16 muestra la variación mensual promedio de concentración de PM<sub>2,5</sub>, mismos que fueron evaluados por las estaciones de calidad de aire del SENAMHI (estaciones Ate, Santa Anita y San Juan de Lurigancho) y por el monitor automático para material particulado fino ubicado en la Embajada de los Estados Unidos, para el período de diciembre de 2018 a marzo de 2019. Cabe mencionar que, debido a que la estación de calidad de aire del SENAMHI ubicada en Huachipa no registró valores para el material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) no se tomó en cuenta en el presente trabajo.

De la Figura 16 se observa que los mayores valores de concentración promedio de PM<sub>2,5</sub> son variados de acuerdo a la estación de monitoreo; para el caso de las estaciones de SENAMHI: Ate midió datos para los meses de diciembre de 2018 y marzo de 2019 registrándose valores promedios mensuales de concentración de 29,85  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 31,29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente; Santa Anita midió datos para los meses de diciembre de 2018 y enero de 2019 registrándose valores promedios mensuales de concentración de 27,70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 23,61  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; San Juan de Lurigancho midió datos para los cuatro meses de monitoreo registrándose el pico máximo de concentración en el mes de enero de 2018 (32,55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). En el caso del monitor ubicado en la Embajada de los Estados Unidos (Santiago de Surco), el máximo pico de concentración

mensual se registró para el mes de diciembre de 2018 con un valor de 22,15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y el mínimo valor se registró para el mes de febrero (14,95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).



**Figura 16:** Variación mensual de concentración del  $\text{PM}_{2,5}$  en Lima Este para las estaciones de SENAMHI y la Embajada de los Estados Unidos, durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019

**FUENTE:** Elaboración propia

En general para el periodo de estudio se observan valores de concentración de  $\text{PM}_{2,5}$  bajos para las estaciones de monitoreo en Lima Este y Santiago de Surco, los resultados presentados en esta investigación concuerdan con los obtenidos por Pacsi (2016) y Ordóñez-Aquino *et al.* (2016) quienes atribuyen estos valores de concentración a condiciones meteorológicas predominantes de inestabilidad atmosférica y turbulencia en los meses de verano. Asimismo, Hujia *et al.* (2015) realizaron un estudio en la ciudad de Chengdú (Sichuan, China) para el periodo de 2009 a 2011; encontrando que los máximos picos de concentración de  $\text{PM}_{2,5}$  se presentaron en la época de invierno y los picos mínimos de  $\text{PM}_{2,5}$  se presentaron en verano, lo que se puede atribuir a que en verano la capa de mezcla se encuentra a una mayor altitud que en invierno, lo que favoreció la dispersión de los contaminantes; por otro lado menciona que, en verano disminuye la humedad relativa lo que conlleva a que se inhiba la formación de material particulado por crecimiento higroscópico. Finalmente, según DIGESA (2000), la altura de la capa de mezcla alcanza un mayor valor

en verano (675 m.s.n.m.) respecto a invierno (290 m.s.n.m.), conforme a la base de la inversión térmica por subsidencia, siendo coherente con los valores mínimos de concentración de PM<sub>2,5</sub> en el periodo de estudio del presente trabajo.

En relación a los Estándares de Calidad Ambiental para Aire (ECA-Aire), de manera *referencial*, se observa que para el parámetro PM<sub>2,5</sub> superó el valor límite anual de 25 µg/m<sup>3</sup> para las estaciones de Lima Este de Ate y San Juan de Lurigancho así como para el monitor de la Embajada de los Estados Unidos. Adicionalmente; se precisa que para el valor guía establecido por la Organización Mundial de la Salud para concentraciones anuales de PM<sub>2,5</sub> (10 µg/m<sup>3</sup>), las estaciones de SENAMHI de Lima Este y la Embajada de Estados Unidos superaron el nivel de concentración establecido según las concentraciones mensuales de PM<sub>2,5</sub>.



**Figura 17:** Variación mensual del Índice de Calidad del Aire (INCA) para PM<sub>2,5</sub> en Lima Este para las estaciones de SENAMHI y la Embajada de los Estados Unidos, durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019

FUENTE: Elaboración propia

En la Figura 17 se evalúa de manera *referencial* el Índice de Calidad de Aire (INCA) mensual para las estaciones de SENAMHI ubicadas en Lima Este así como el monitor de la Embajada de los Estados Unidos (Santiago de Surco), para el periodo de estudio de diciembre de 2018

a marzo de 2019. Se puede observar que para las estaciones de Lima Este y la Embajada de Estados Unidos la calidad del aire es entre moderada a mala lo cual quiere decir que la población en general podría verse afectada y experimentar problemas en la salud. Por otro lado, y como se observó en la Figura 16, la calidad del aire en la Embajada de los Estados Unidos es moderada dado que su INCA para todos los meses es inferior a 100, lo que implica que se pueden realizar actividades en ambientes con algunas limitaciones para la población sensible como lo son niños, madres gestantes, etc.

#### **b. Comportamiento mensual de la concentración de PM<sub>2,5</sub> en el área de estudio**

Como se describe en la metodología, para el presente trabajo de investigación se utilizaron tres muestreadores de PM<sub>2,5</sub> ubicados en la azotea del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria La Molina, durante el periodo de diciembre de 2018 a marzo de 2019.

Para poder alcanzar el objetivo de evaluar la variación mensual del PM<sub>2,5</sub>, durante el periodo de muestreo, se evaluó estadísticamente los valores obtenidos a través de pruebas de normalidad, homogeneidad de varianza y pruebas de significancia.

Como primero paso, se agrupó los valores de concentración de PM<sub>2,5</sub> obtenidos por cada muestreador por mes (cuatro grupos por equipo), luego se aplicó la prueba estadística de Anderson Darling para evaluar la normalidad de cada grupo de datos, para ello se aplicó el software de prueba Minitab 18. Para el muestreador Microvol – 1100, se obtuvo que para el periodo de diciembre a marzo los valores promedio mensuales siguen una distribución normal, con un p valor de 0,158. Para el muestreador Partisol 2000H, se obtuvo que para el periodo de diciembre a marzo los valores promedio mensuales siguen una distribución normal, con un p valor de 0,371. Finalmente, para el muestreador Hivol – 3000 se obtuvo que para el periodo de diciembre a marzo los valores promedio mensuales siguen una distribución normal, con un p valor de 0,853.

Posterior a evaluar la normalidad de los datos de PM<sub>2,5</sub>, se analizó la homogeneidad de varianzas de los tres grupos de concentración mensual, para ello se aplicó la prueba de Levene a través del software de prueba Minitab 18. Como resultado se obtuvo un p valor de 0,801 el cual es mayor al nivel de significancia ( $\alpha = 0,05$ ); por lo tanto, se puede decir que

existe homogeneidad de varianzas entre los valores de concentración por mes obtenidos con los equipos Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol - 3000.

Para determinar si existe diferencia significativa entre los tres grupos de concentración de PM<sub>2,5</sub> durante el periodo de muestreo se aplicó la prueba ANOVA de un solo factor para los tres muestreadores, lo cual se muestra en la Tabla 14.

**Tabla 14:** Resultado de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de PM<sub>2,5</sub> obtenidos en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo; para los muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol - 3000

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajustado</b>	<b>MC Ajustado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Factor</b>	2	805,26	402,628	55,41	0,000
<b>Error</b>	9	65,39	7,266		
<b>Total</b>	11	870,65			

FUENTE: Elaboración propia

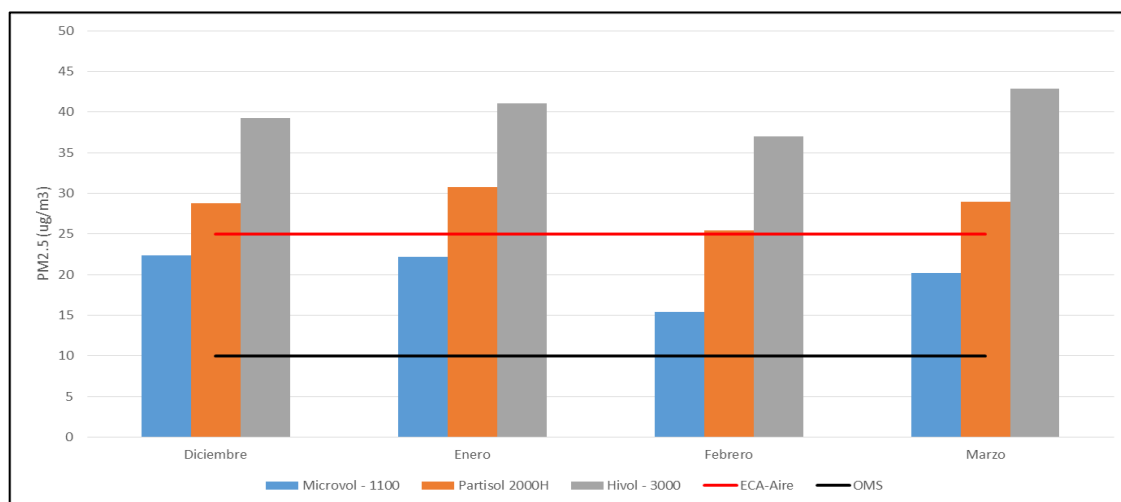
La Tabla 14 muestra los resultados de aplicar la prueba ANOVA de un solo factor sobre los grupos obtenidos de agrupar datos de concentración de PM<sub>2,5</sub> por mes para los equipos Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol - 3000, en concordancia con las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianza, demuestra que existe evidencia estadística suficiente para decir que las medias poblaciones de dichos grupos son diferentes ya que el p valor obtenido (0,000) es inferior al nivel de significancia ( $\alpha=0,05$ ). Por lo tanto se puede decir, estadísticamente, que entre los grupos de datos de concentración de PM<sub>2,5</sub> de los meses diciembre, enero, febrero y marzo, existe diferencia significativa; es decir, la concentración de PM<sub>2,5</sub> no fue similar en todos los días de la semana.

El detalle de los cálculos estadísticos obtenidos en esta sección se encuentra en el Anexo 6.

La Figura 18 muestra los picos de concentración mensual promedio de PM<sub>2,5</sub> para cada muestreador, para el caso del Microvol – 1100 el valor máximo se registra en el mes de diciembre con una concentración de 22,40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; asimismo, para el caso del Partisol 2000H el valor máximo se registra en el mes de enero con una concentración de 30,78  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; finalmente, para el caso del Hivol - 3000 el valor máximo se registra en el mes de marzo con una concentración de 42,87  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por otro lado, los valores mínimos de concentración se



registran en el mes de febrero para los tres equipos: Microvol – 1100 ( $15,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Partisol 2000H ( $25,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y Hivol – 3000 ( $36,95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).



**Figura 18:** Variación mensual de la concentración del  $\text{PM}_{2,5}$  en la zona de estudio utilizando los muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000; durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019

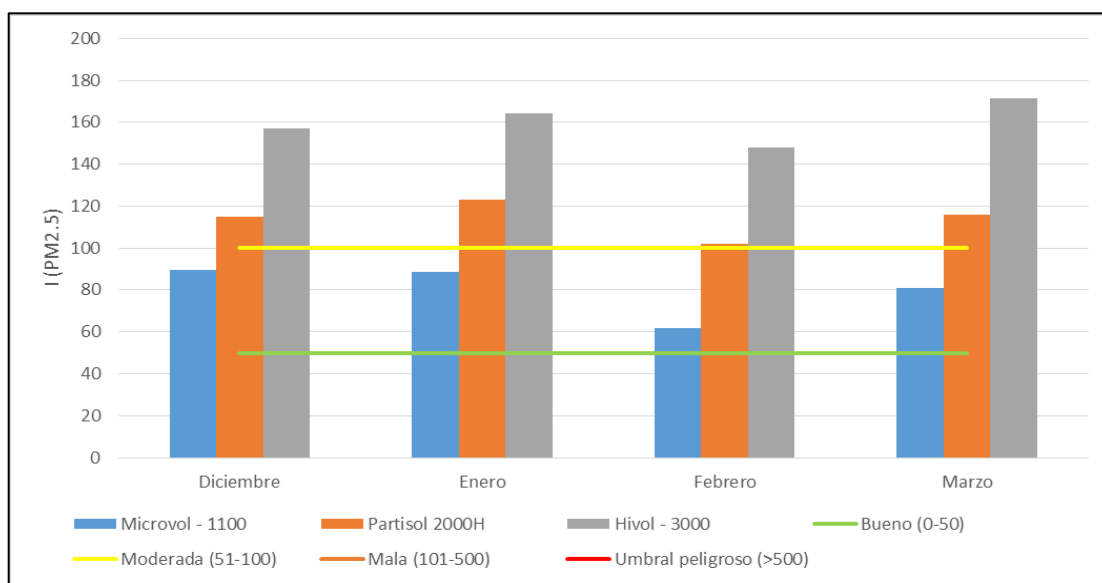
**FUENTE:** Elaboración propia

Los resultados de concentración de  $\text{PM}_{2,5}$  obtenidos en la presente investigación son coherentes y similares a los resultados encontrados por Pacsi (2016) y Ordóñez-Aquino *et al.* (2016), quienes evaluaron la variación mensual del  $\text{PM}_{2,5}$  en El Agustino y Lima metropolitana, respectivamente. Estos estudios demostraron que, para los meses de verano se atribuyen valores bajos de concentración de  $\text{PM}_{2,5}$  debido a condiciones meteorológicas predominantes de inestabilidad atmosférica y turbulencia. Asimismo, y como se evidencia en el numeral anterior, la altura de la capa de mezcla, asociado al límite inferior de la capa de inversión térmica por subsidencia, presenta sus mayores valores en verano lo que favorece una mayor dispersión del material particulado fino, lo que podría explicar los valores mínimos encontrados en el presente trabajo.

En relación a los Estándares de Calidad Ambiental para Aire (ECA-Aire), de manera *referencial*, se observa que para el parámetro  $\text{PM}_{2,5}$  se superó el valor límite anual de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para los tres equipos. Asimismo, se observa que, para el periodo de muestreo, el muestreador Microvol – 1100 subvalora la concentración de  $\text{PM}_{2,5}$  mientras que el equipo

Hivol – 3000 sobrevalora la concentración de  $PM_{2.5}$  respecto al equipo Partisol 2000H que como se sabe es el equipo recomendado por la USEPA para evaluar la calidad de aire en relación al parámetro de estudio.

Por otro lado, se precisa que para el valor guía establecido por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2006) para concentraciones anuales de  $PM_{2.5}$  ( $10 \mu g/m^3$ ), los tres muestreadores utilizados, superaron el nivel de concentración durante todos los meses de muestreo, para el periodo de estudio.



**Figura 19:** Variación mensual del Índice de Calidad del Aire (INCA) para  $PM_{2.5}$  en la zona de estudio utilizando los muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000; durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019, durante el periodo diciembre 2018 a marzo 2019

**FUENTE:** Elaboración propia

Lo mencionado en el párrafo anterior se evidencia en la Figura 19, la cual muestra la variación mensual del Índice de calidad de Aire (INCA) para  $PM_{2.5}$  en la zona de estudio con los equipos muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000. Como se observa según el INCA asociado al equipo Microvol – 1100 la calidad del aire en el campus de la UNALM y sus alrededores es moderada; sin embargo, para el caso de los equipos Partisol 2000H y Hivol – 3000, la calidad del aire en el campus de la UNALM y sus alrededores es mala lo cual implicaría problemas de salud en la población sensible a la exposición del  $PM_{2.5}$  como son los niños, las personas de la tercera edad, personas con

enfermedades respiratorias crónicas y cardiovasculares y madres gestantes; y podría afectar a la población en general.

#### **4.2 Relación entre las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> y las variables meteorológicas**

Para responder al cumplimiento del segundo objetivo específico se utilizaron los resultados obtenidos para PM<sub>2,5</sub> medidos en la azotea del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria La Molina, y los valores promedios diarios de las variables meteorológicas temperatura ambiental, humedad relativa, velocidad del viento, precipitación y radiación solar; datos obtenidos por una estación meteorológica automática, ubicada en la azotea del Laboratorio de Recursos Hídricos de la UNALM; para el período de diciembre de 2018 a marzo de 2019. Es preciso mencionar que ambos laboratorios se encuentran separados a una distancia aproximada de 200 metros en la dirección del viento predominante; asimismo, los equipos muestreadores y la estación meteorológica se encuentra a la misma altura aproximada de 6,15 metros.

Como primer paso, se promedió los valores horarios obtenidos por cada variable meteorológica, luego se aplicó la prueba estadística de Anderson Darling para evaluar la normalidad de los valores diarios de cada parámetro, para ello se aplicó el software de prueba Minitab 18. En la Tabla 15 se detallan los resultados de aplicar la prueba de normalidad, obteniéndose que para la variable temperatura ambiental el p valor es de 0,019; para la variable humedad relativa el p valor es de 0,046; para la variable velocidad del viento el p valor es de 0,752 y para la variable radiación solar el p valor es de 0,237. Se observó que, para el periodo de muestreo, las variables meteorológicas de temperatura ambiental y humedad relativa no siguen una distribución normal ya que el p valor es inferior al nivel de significancia ( $\alpha=0,05$ ); por el contrario, las variables meteorológicas de velocidad del viento y radiación solar siguen una distribución normal ya que el p valor es superior al nivel de significancia ( $\alpha=0,05$ ).

El detalle de los cálculos estadísticos obtenidos en esta sección se encuentra en el Anexo 6.

Como segundo paso, se evaluó el nivel de relación existente entre las variables meteorológicas medidas por la estación automática del Laboratorio de Recursos Hídricos y la concentración de PM<sub>2,5</sub> obtenidas por cada muestreador en campo; para ello se aplicó la prueba estadística no paramétrica de Correlación de Spearman para los parámetros de

temperatura ambiental promedio y humedad relativa (por no presentar una distribución de datos normal), mientras que para los parámetros de velocidad de viento y radiación solar se aplicó la prueba estadística paramétrica de Correlación de Pearson.

**Tabla 15:** Resultados de la prueba estadística de normalidad Anderson Darling para las variables meteorológicas: temperatura ambiental, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, durante el periodo de diciembre del 2018 a marzo del 2019

Parámetros meteorológicos	Número de datos	Anderson Darling	p-valor
Temperatura ambiental (°C)	50	0,912	0,019
Humedad relativa (%)	50	0,757	0,046
Viento (m/s)	50	0,244	0,752
Radiación solar (W/m <sup>2</sup> )	50	0,470	0,237

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 16:** Resultados de las pruebas estadísticas de correlación de Spearman y Pearson, entre variables meteorológicas y concentración de PM<sub>2,5</sub> en el área de estudio

Parámetro meteorológico	Coeficiente de correlación	Muestreador		
		Microvol	Partisol	Hivol
Temperatura ambiental (°C)	Spearman	-0,606	-0,268	-0,126
	p valor	0,000	0,082	0,432
Humedad relativa (%)	Spearman	0,453	0,209	-0,149
	p valor	0,012	0,178	0,351
Velocidad de viento (m/s)	Pearson	0,038	-0,020	-0,130
	p valor	0,842	0,899	0,418
Radiación solar (W/m <sup>2</sup> )	Pearson	-0,332	-0,086	0,125
	p valor	0,073	0,582	0,435

FUENTE: Elaboración propia

La Tabla 16 muestra los resultados de aplicar las pruebas estadísticas de correlación de Pearson y Spearman obteniéndose que para las variables de temperatura ambiental promedio, velocidad de viento y radiación solar existe una relación predominantemente negativa; mientras que, para la variable meteorológica humedad relativa la relación es positiva, para el periodo de monitoreo de diciembre de 2018 a marzo de 2019. Estos

resultados son coherentes con los valores obtenidos por Murriel (2016) en el campus de la UNALM.

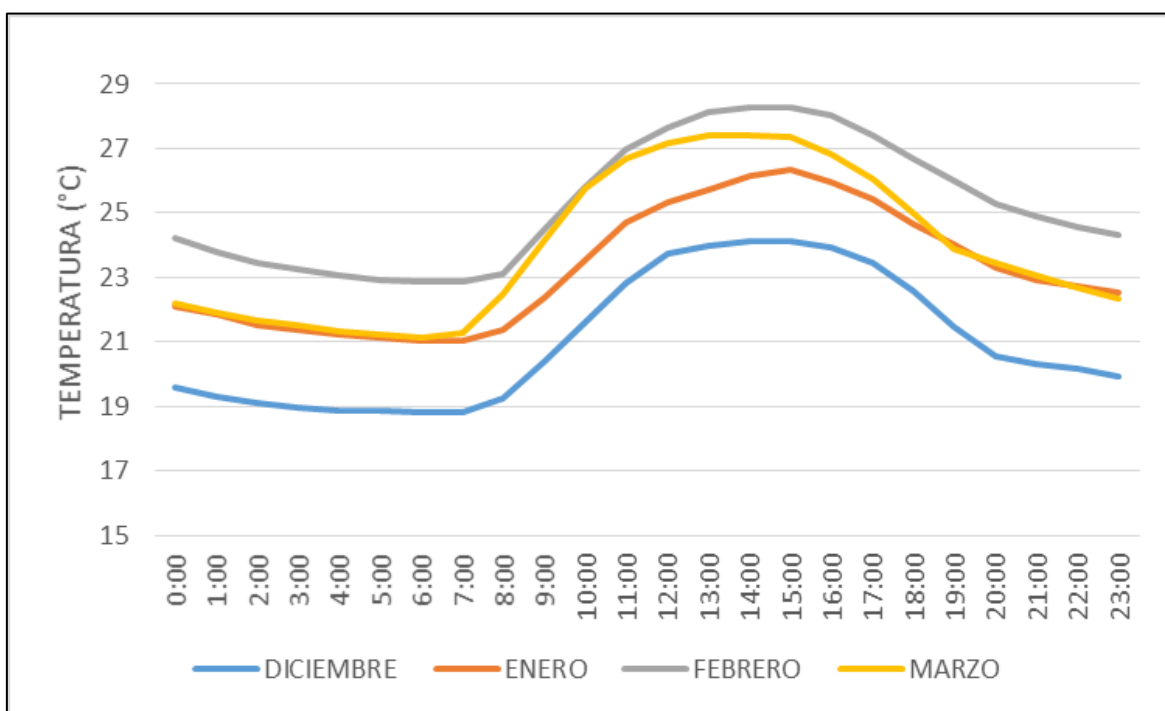
El detalle de los cálculos estadísticos obtenidos en esta sección se encuentra en el Anexo 7.

El comportamiento de cada variable meteorológica evaluada y su relación con la concentración de PM<sub>2,5</sub> obtenida en campo se analiza a continuación:

#### 4.2.1 Temperatura ambiental (°C)

En la Figura 20 se muestra la variación horaria de la temperatura del aire para cada uno de los meses dentro del periodo de estudio. Se observa que la temperatura va aumentando conforme se va ingresando cada vez más en los meses de verano (diciembre - marzo).

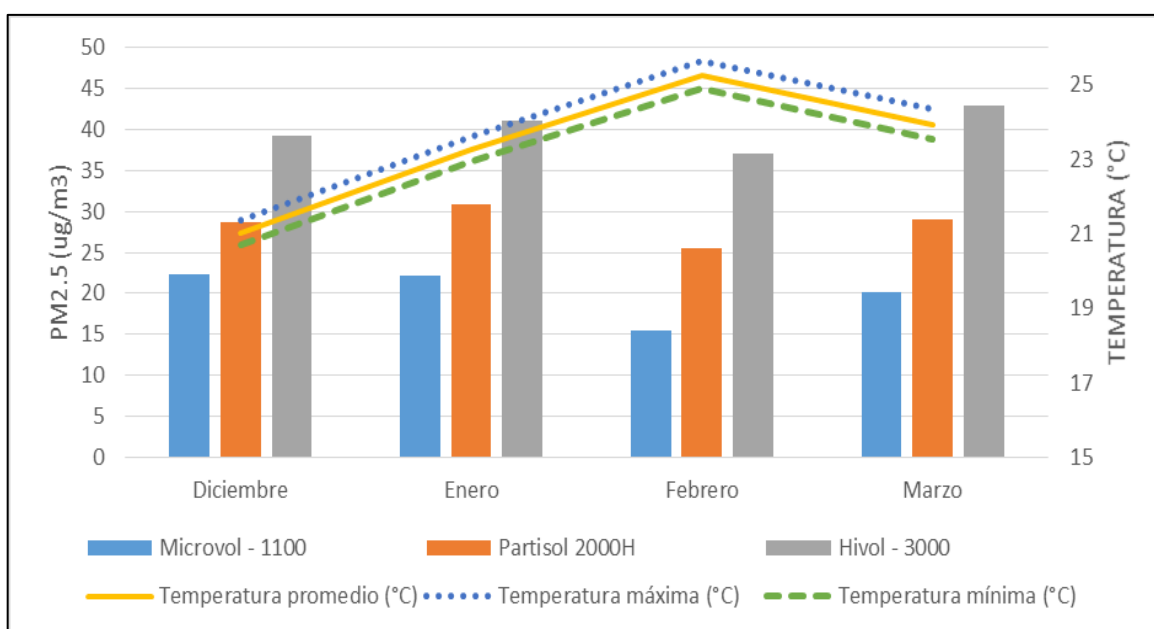
Los valores máximos en promedio horario se presentaron entre las 14 horas y las 15 horas y los valores mínimos se presentaron entre las 5 horas y las 6 horas. El máximo promedio horario presentado en todo el periodo fue de 28,3 °C (febrero) y el mínimo promedio horario presentado en todo el periodo fue de 18,8 °C (diciembre).



**Figura 20:** Variación horaria de la temperatura del aire promedio para los meses de diciembre de 2018 a marzo de 2019

FUENTE: Elaboración propia

Como se determinó en la Tabla 16, la temperatura ambiental tiene una relación negativa respecto a los equipos Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000 con valores de correlación de -0,606; -0,268 y -0,126, respectivamente. Si bien no se observa un nivel correlación significativa ( $p$  valor  $< 0,05$ ) para los muestreadores Partisol y Hivol, en la Figura 21 se muestra que los valores bajos de concentración de  $PM_{2,5}$  se presentan en el mes de febrero, donde se registró el pico máximo de temperatura, esta relación se puede deber a que las altas temperaturas registradas durante el periodo de estudio generan corrientes térmicas verticales que expanden verticalmente la altura de la capa de mezcla (Jiménez, 2016), lo que permite una dispersión rápida y eficaz del material particulado, mediante procesos de convección térmica, disminuyendo la concentración del  $PM_{2,5}$  en el aire (Hujia *et al.*, 2015).



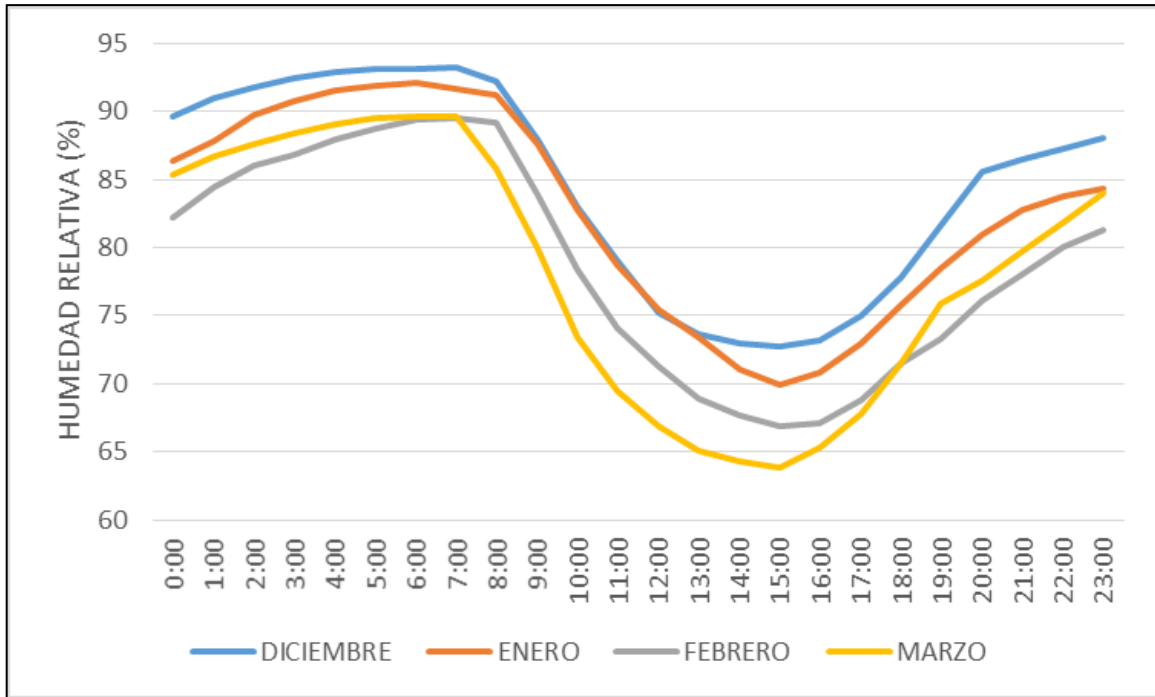
**Figura 21:** Variación mensual de la concentración de  $PM_{2,5}$  utilizando los equipos Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000, y su relación con la temperatura promedio

**FUENTE:** Elaboración propia

#### 4.2.2 Humedad relativa (%)

En la Figura 22 se muestra la variación horaria de la humedad relativa para cada uno de los meses dentro del periodo de estudio. Se observa que la humedad relativa va disminuyendo conforme se va ingresando cada vez más en los meses de verano (diciembre – marzo).

Los valores máximos en promedio horario se presentaron entre las 07 horas y 08 horas, así como entre las 20 horas y 21 horas; por otro lado, los valores mínimos se presentaron entre las 14 horas y 15 horas. El máximo promedio horario presentado en todo el periodo fue de 93 por ciento (diciembre) y el mínimo promedio horario presentado en todo el periodo fue de 64 por ciento (marzo).

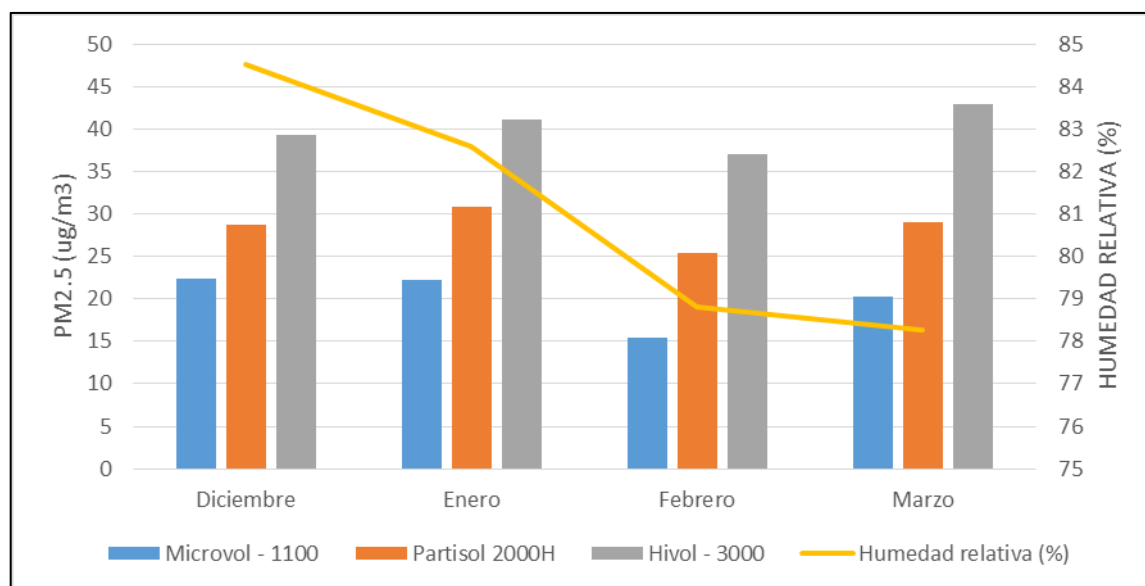


**Figura 22:** Variación horaria de la humedad relativa promedio para los meses de diciembre de 2018 a marzo de 2019

**FUENTE:** Elaboración propia

Como se determinó en la Tabla 16, la humedad relativa tiene una relación positiva respecto a los equipos Microvol – 1100 y Partisol 2000H y negativa respecto al equipo Hivol – 3000 con valores de correlación de 0,453; 0,209 y -0,149, respectivamente. Si bien no se observa un nivel de correlación significativa ( $p$  valor  $< 0,05$ ) para los muestreadores Partisol y Hivol, en la Figura 23 se muestra que los valores bajos de concentración de  $PM_{2,5}$  se presentan en el mes de febrero donde se registró el pico mínimo de humedad relativa, esta relación se puede deber a que los valores bajos de humedad relativa registrados durante el periodo de estudio, no promueven la formación de material particulado fino a través de núcleos de

condensación de partículas higroscópicas (tierra, polen, residuos de combustión) (Hujia *et al.*, 2015). Asimismo, condiciones meteorológicas de alta temperatura y baja humedad relativa previenen la formación secundaria del PM<sub>2,5</sub> (Leiva-Guzmán *et al.*, 2017), lo cual es coherente con los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación.



**Figura 23:** Variación mensual de la concentración de PM<sub>2,5</sub> utilizando los equipos Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000, y su relación con la humedad relativa

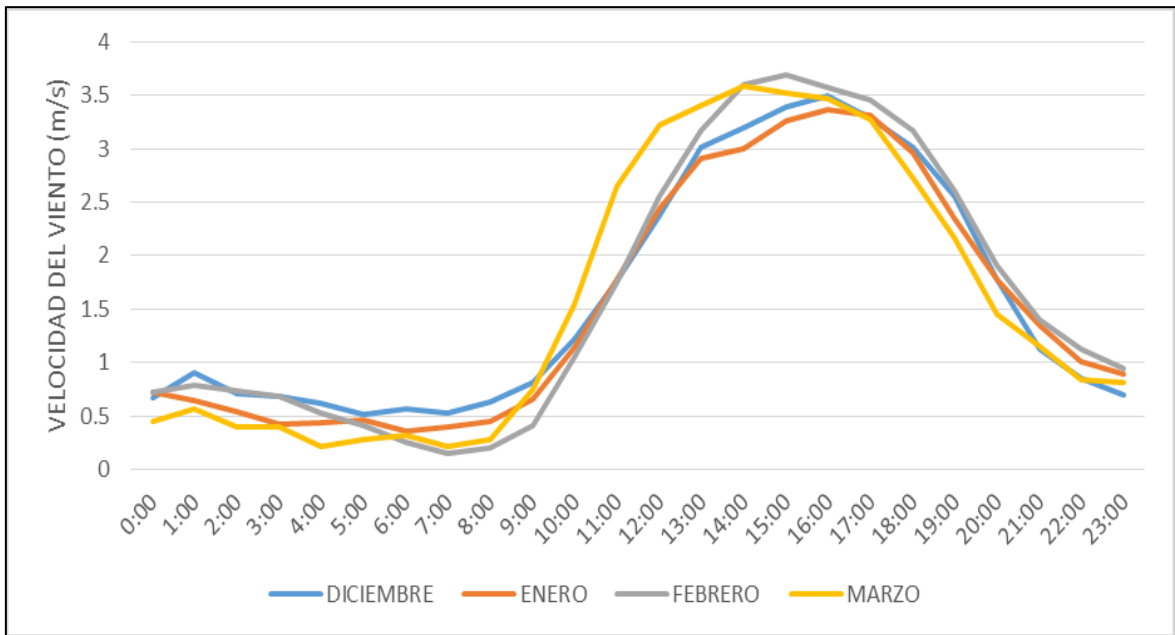
**FUENTE:** Elaboración propia

#### 4.2.3 Velocidad y dirección del viento (m/s)

En la Figura 24 se muestra la variación horaria de la velocidad del viento para cada uno de los meses dentro del periodo de estudio. Se observa que la velocidad del viento presenta valores altos en los meses de diciembre y febrero, mientras que para los meses de enero y marzo presenta valores bajos.

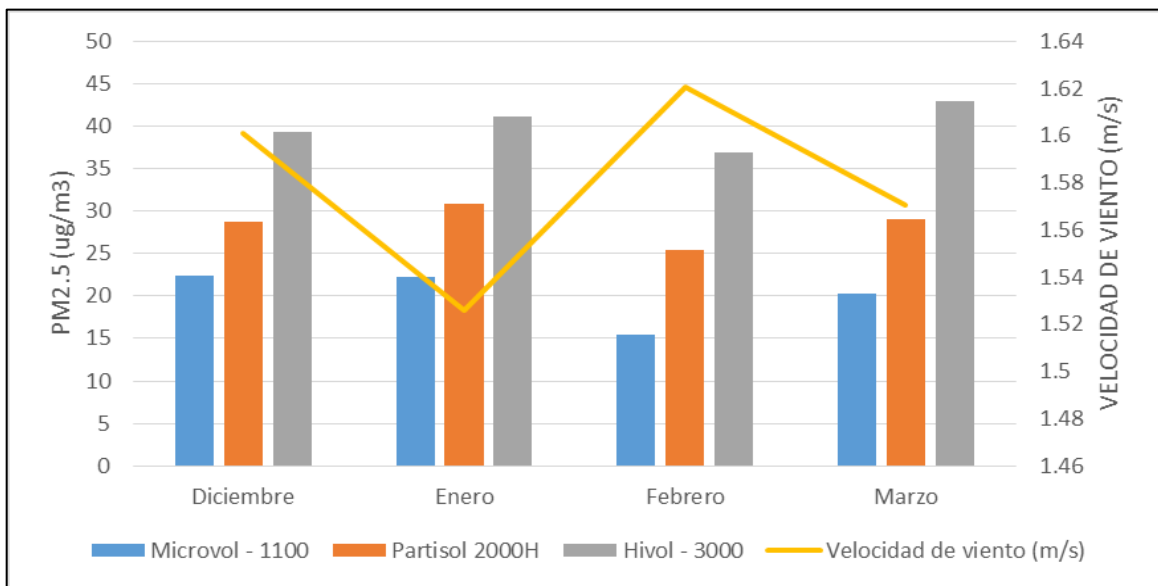
Los valores máximos en promedio horario se presentaron entre las 14 horas y 15 horas, los valores mínimos se presentaron entre las 07 horas y 08 horas. El máximo promedio horario presentado en todo el periodo fue de 3,7 m/s (febrero) y el mínimo promedio horario presentado en todo el periodo fue de 0,2 m/s (febrero).





**Figura 24:** Variación horaria de la velocidad del viento promedio para los meses de diciembre de 2018 a marzo de 2019

FUENTE: Elaboración propia



**Figura 25:** Variación mensual de la concentración de PM<sub>2,5</sub> utilizando los equipos Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000, y su relación con la velocidad de viento

FUENTE: Elaboración propia

Como se determinó en la Tabla 16, la velocidad de viento tiene una relación negativa respecto a los equipos Partisol 2000H y Hivol - 3000 y positiva respecto al equipo Microvol

- 1100 con valores de correlación de -0,020; -0,130 y 0,038, respectivamente. Si bien no se observa un nivel de correlación significativa ( $p$  valor  $< 0,05$ ) para los tres muestreadores, en la Figura 25 se muestra que los valores bajos de concentración de  $PM_{2,5}$  se presentan en el mes de febrero donde se registró el pico máximo de velocidad del viento, esta relación se puede deber a que este parámetro meteorológico genera una turbulencia mecánica en el eje horizontal que favorece la dispersión del contaminante en el aire (Hujia *et al.*, 2017).

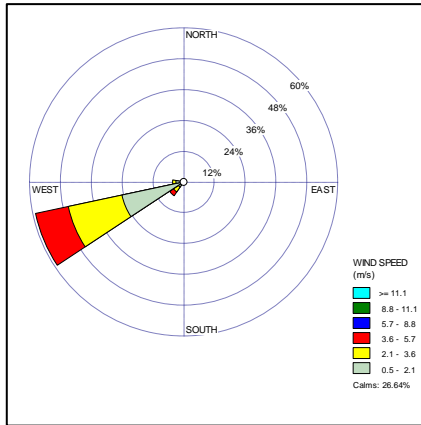
De la Figura 26, se puede observar que el principal aporte de material particulado transportado por el viento proviene de las actividades desarrolladas en esa dirección como son la agricultura en los campos de cultivo, así como el tránsito vehicular de la avenida Alameda del Corregidor.

Utilizando el *software* WR Plot se elaboró la rosa de vientos correspondiente al periodo de monitoreo de diciembre de 2018 a marzo de 2019, lo cual se muestra en la Figura 27, en ella se observa que la dirección predominante de las masas de aire mantiene el mismo patrón para todos los meses, proveniente del oeste-suroeste en más del 58 por ciento. Asimismo, se observa que un 33,5 por ciento del viento presenta velocidades entre los 0,5 a 2,1 m/s, seguido de una 25,1 por ciento del viento que presenta velocidades entre los 2,1 a 3,6 m/s. Se presentan calmas en un 26,7 por ciento.

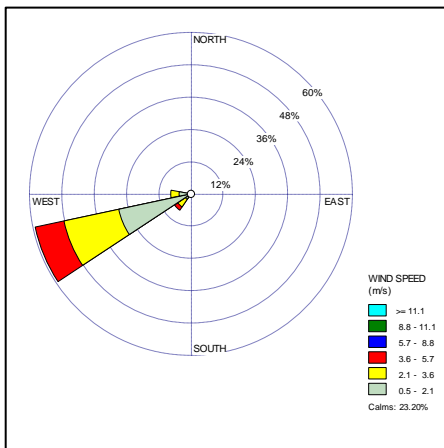


**Figura 26:** Representación gráfica de la dirección predominante del viento durante el periodo de monitoreo respecto de la ubicación del campus de la UNALM.

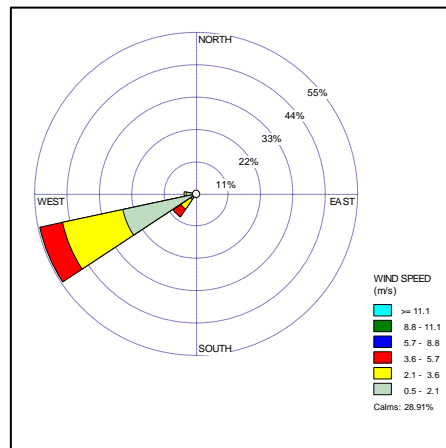
**FUENTE:** Elaboración propia usando mapas de Google Earth



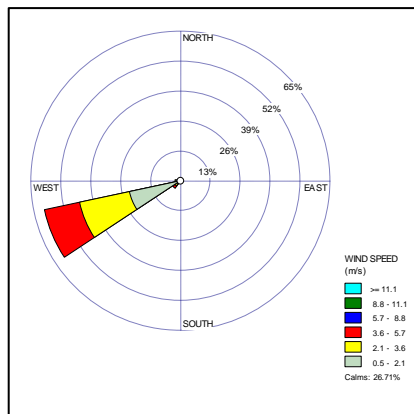
(a)



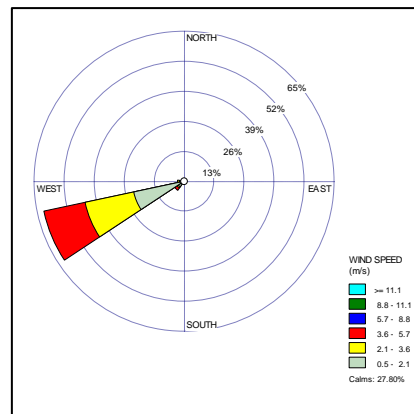
(b)



(c)



(d)



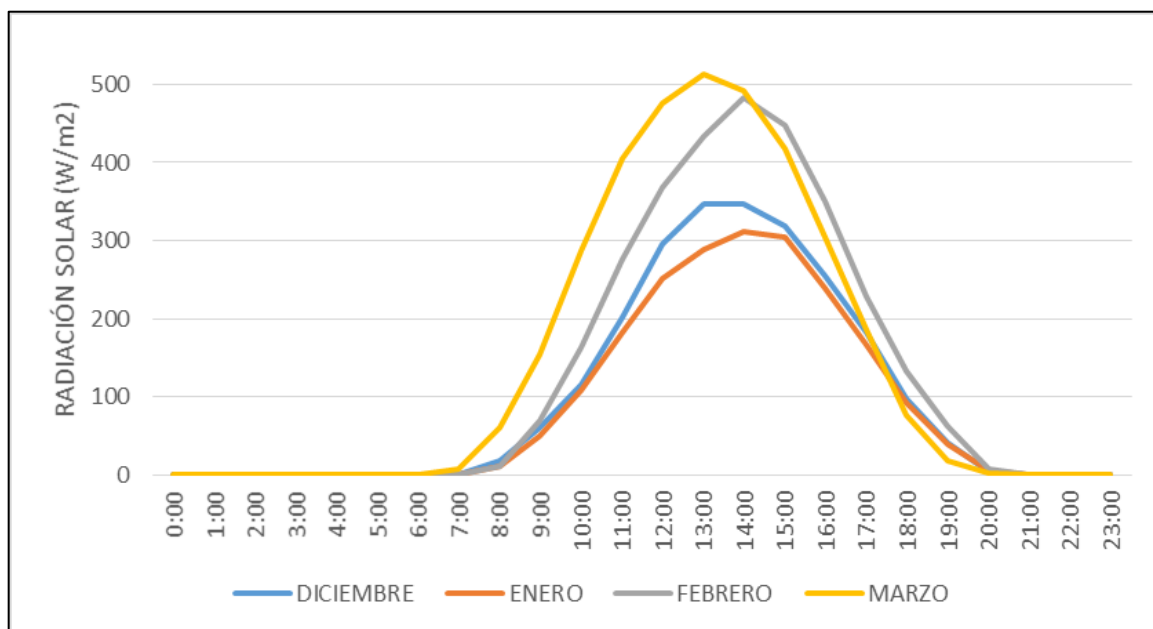
(e)

**Figura 27:** Variación mensual de la dirección de viento promedio para el periodo de (a) diciembre de 2018 a marzo de 2019, (b) diciembre de 2018, (c) enero de 2019, (d) febrero de 2019 y (e) marzo de 2019.

**FUENTE:** Elaboración propia usando el *software* WR Plot

#### 4.2.4 Radiación solar ( $W/m^2$ )

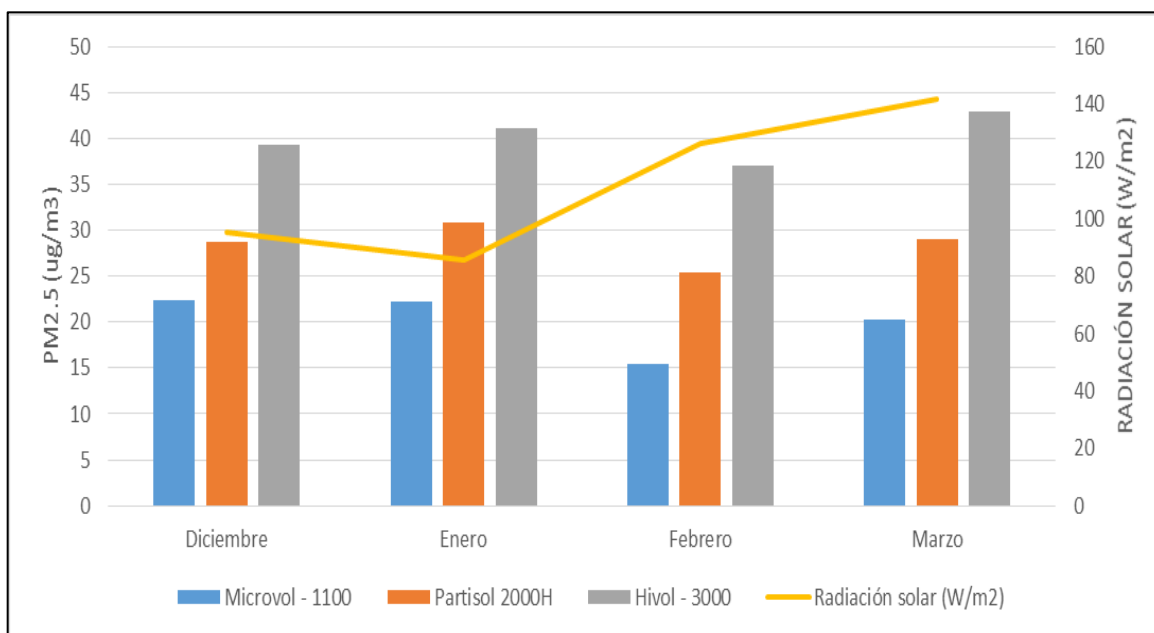
En la Figura 28 se muestra la variación horaria de la radiación solar para cada uno de los meses dentro del periodo de estudio. Se observa que la radiación solar va aumentando conforme se va ingresando cada vez más en los meses de verano (diciembre - marzo).



**Figura 28:** Variación horaria de la radiación solar promedio para los meses de diciembre de 2018 a marzo de 2019

Los valores máximos en promedio horario se presentaron entre las 13 horas y 14 horas y los valores mínimos se presentaron a las 8 horas y 20 horas. El máximo promedio horario presentado en todo el periodo fue de  $512,3 W/m^2$  (marzo) y el máximo promedio mensual presentado en todo el periodo fue de  $141,6 W/m^2$ . Como se determinó en la Tabla 16, la radiación solar tiene una relación negativa respecto a los equipos Microvol – 1100, Partisol 2000H y positiva para el equipo Hivol – 3000, con valores de correlación de -0,332: -0,086 y 0,125 respectivamente. Si bien no se observa un nivel de correlación significativo ( $p < 0,05$ ) para los tres muestreadores, en la Figura 29 se muestra que los valores bajos de concentración de  $PM_{2,5}$  se presentan en el mes de febrero, donde se registró el pico máximo de radiación solar, esta relación se puede deber a que una mayor incidencia de la irradiación solar provoca un aumento de la temperatura y por consiguiente un aumento en la turbulencia térmica (Cuesta *et al.*, 2015) permitiendo así una mayor dispersión del material particulado fino. Asimismo, Kouyoumdjian y Saliba (2006) y Bi *et al.* (2015) mencionan que la radiación solar favorece la formación de nitratos y sulfatos en el aire (precursores del  $PM_{2,5}$ );

sin embargo, Llanos (2016) determinó que en promedio el contenido total de estos aniones en el material particulado fino corresponde a un 22,5 por ciento destacando la concentración de sulfato sobre el nitrato, estos resultados explicarían por que no se obtuvieron valores altos de concentración del PM<sub>2,5</sub> pese a que se obtuvieron valores altos de radiación solar.



**Figura 29:** Variación mensual de la concentración de PM<sub>2,5</sub> utilizando los equipos Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol – 3000, y su relación con la radiación solar

FUENTE: Elaboración propia

#### 4.3 Relación entre la metodología gravimétrica de alto volumen (Hivol – 3000) y la metodología gravimétrica de bajo volumen (Partisol 2000H), y determinación de ecuaciones de corrección

Como se describe en la metodología, para dar cumplimiento al objetivo específico de evaluar la relación entre los equipos muestreadores Hivol – 3000 y Partisol 2000H, así como determinar las ecuaciones de corrección para el equipo Hivol – 3000, durante el periodo de muestreo, se aplicaron pruebas estadísticas de normalidad, análisis de varianza y finalmente análisis de regresión lineal mensuales a los grupos de concentración de PM<sub>2,5</sub> calculados.

Como primer paso se aplicó la prueba de normalidad para los datos de las concentraciones de material particulado fino obtenidas con el Hivol – 3000 y para las concentraciones obtenidas con el Partisol 2000H en los mismos días. La Tabla 17 muestra que el valor de probabilidad p es mayor a 0,05 para ambos casos, por lo que los datos cumplen con la

normalidad. Asimismo, se observa que se obtuvieron 34 datos de concentración validados para los mismos días monitoreados por ambos equipos.

**Tabla 17: Resultados de la prueba estadística Ryan Joiner aplicada a los grupos de datos de concentración de PM<sub>2,5</sub> obtenidos con el Hivol – 3000 los mismos días monitoreados con el Partisol 2000H**

Muestreador	Número de datos	Ryan Joiner	p-valor
Hivol - 3000	34	0,974	>0,100
Partisol 2000H	34	0,969	0,064

FUENTE: Elaboración propia

Como segundo paso, para determinar si verdaderamente existe regresión lineal entre ambos grupos de datos durante el periodo total de muestreo se aplicó la prueba de análisis de varianza, lo cual se muestra en la Tabla 18.

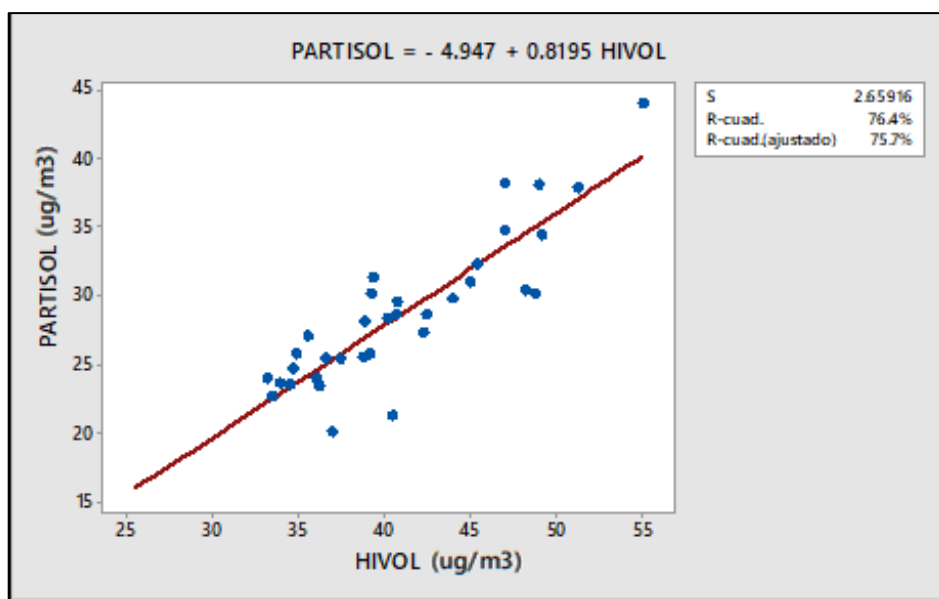
**Tabla 18: Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Hivol – 3000 vs. Partisol 2000H, para el período de muestreo diciembre 2018 a febrero 2019**

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor p
<b>Regresión</b>	1	734,389	734,389	103,86	0,000
<b>Error</b>	32	226,276	7,071		
<b>Total</b>	33	960,664			

FUENTE: Elaboración propia

De la Tabla 18 se observa que el análisis de varianza, a través de la prueba estadística F, nos da como resultado un p valor de 0,000; por consiguiente, debido a que el valor obtenido es menor a 0,05; la hipótesis nula se rechaza a un nivel de significancia  $\alpha = 5$  por ciento. Esto permite afirmar que si existe regresión lineal entre las concentraciones de material particulado observadas con ambas metodologías.

Finalmente, se aplicó el análisis de regresión lineal a los pares de datos de concentración durante el periodo de muestreo. En la Figura 30 se puede observar una buena respuesta a la relación lineal entre el equipo Hivol – 3000 vs. Partisol 2000H.



**Figura 30:** Relación entre las concentraciones de  $PM_{2,5}$  obtenidas con el Hivol – 3000 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el periodo de diciembre del 2018 a febrero del 2019

**FUENTE:** Elaboración propia

Según el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) hallado, el 76,4 por ciento de la variación de los datos es explicado por el modelo de regresión lineal “ $PARTISOL = -4,947+0,8195xHIVOL$  ( $\mu g/m^3$ )”. Según el coeficiente de correlación hallado  $r = 0,874$  se puede señalar que el modelo cuenta con una elevada correlación positiva. Asimismo, Levin y Rubin (2004) mencionan que para el uso del análisis de regresión y correlación, las ecuaciones estimadas son válidas y aplicables para el rango dentro del cual se tomó la muestra, por lo que la ecuación de regresión determinada se debe aplicar sobre el intervalo de  $25,43 \mu g/m^3$  a  $54,95 \mu g/m^3$ .

En relación al análisis de correlación correspondiente al mes de diciembre, se cuentan con ocho pares de datos de días de muestreo validados coincidentes en ambos equipos. Para determinar si verdaderamente existe regresión lineal entre las concentraciones de  $PM_{2,5}$  para ambos muestreadores se aplicó la prueba de análisis de varianza lo cual se muestra en la Tabla 19.

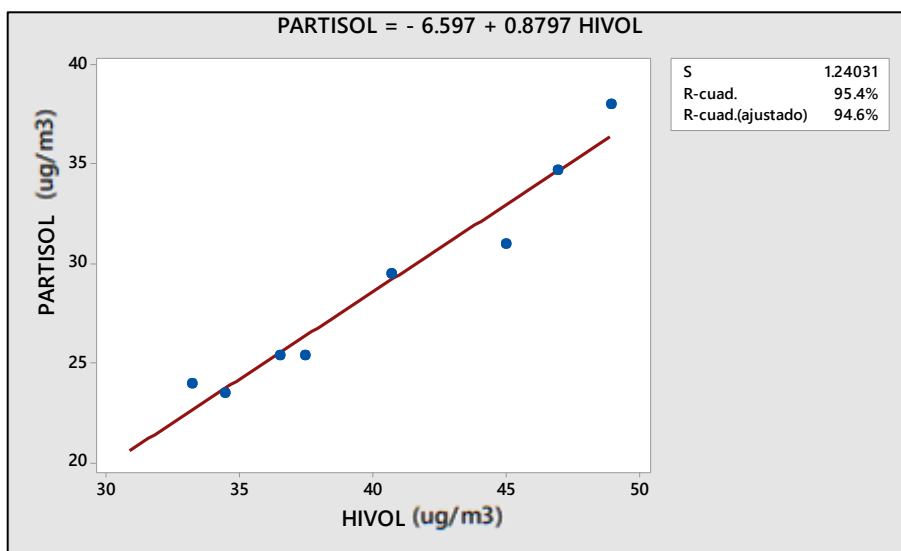
**Tabla 19:** Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Hivol – 3000 vs. Partisol 2000H, para el mes de diciembre de 2018

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor p
<b>Regresión</b>	1	191,100	191,100	124,22	0,000
<b>Error</b>	6	9,230	1,538		
<b>Total</b>	7	200,330			

FUENTE: Elaboración propia

De la Tabla 19 se observa que el análisis de varianza, a través de la prueba estadística F, nos da como resultado un p valor de 0,000; por consiguiente, debido a que el valor obtenido es menor a 0,05; la hipótesis nula se rechaza a un nivel de significancia  $\alpha = 5$  por ciento. Esto permite afirmar que si existe regresión lineal entre las concentraciones de material particulado observadas con ambas metodologías.

Finalmente, se aplicó el análisis de regresión lineal a los pares de datos de concentración durante el periodo de muestreo. En la Figura 31 se puede observar una buena respuesta a la relación lineal entre el equipo Hivol – 3000 vs. Partisol 2000H.



**Figura 31:** Relación entre las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> obtenidas con el Hivol – 3000 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el mes de diciembre de 2018

FUENTE: Elaboración propia



Según el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) hallado, el 95,4 por ciento de la variación de los datos es explicado por el modelo de regresión lineal “PARTISOL = -6,597 + 0,8797xHIVOL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )”. Según el coeficiente de correlación hallado  $r = 0,977$  se puede señalar que el modelo cuenta con una elevada correlación positiva. Asimismo, Levin y Rubin (2004) mencionan que para el uso del análisis de regresión y correlación, las ecuaciones estimadas son válidas y aplicables para el rango dentro del cual se tomó la muestra, por lo que la ecuación de regresión determinada se debe aplicar sobre el intervalo de 30,86  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 48,86  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En relación al análisis de correlación correspondiente al mes de enero se cuentan con doce pares de datos de días de muestreo validados coincidentes en ambos equipos. Para determinar si verdaderamente existe regresión lineal entre las concentraciones de  $\text{PM}_{2,5}$  para ambos muestreadores se aplicó la prueba de análisis de varianza lo cual se muestra en la Tabla 20.

**Tabla 20:** Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Hivol – 3000 vs. Partisol 2000H, para el mes de enero de 2019

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>MC</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Regresión</b>	1	361,040	361,040	31,09	0,000
<b>Error</b>	10	116,116	11,612		
<b>Total</b>	11	477,156			

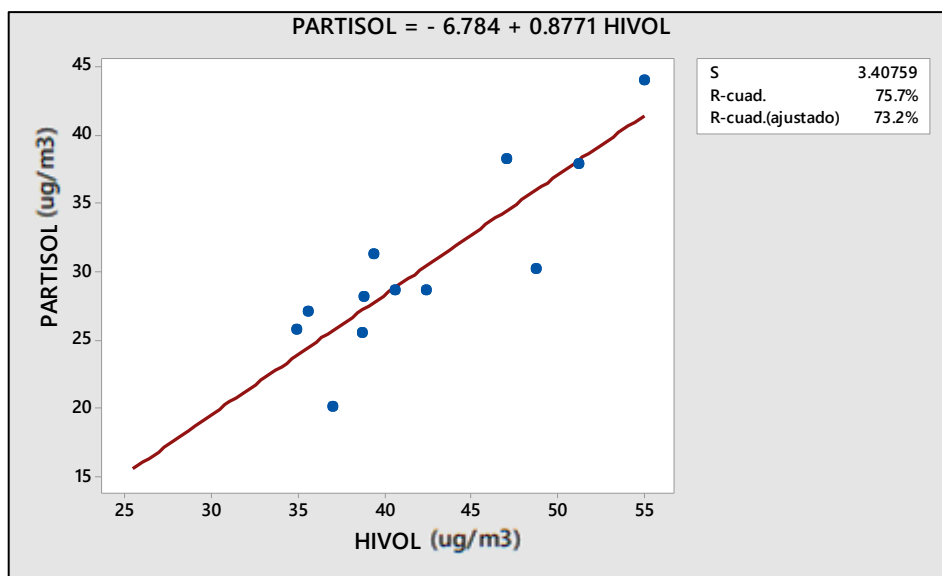
FUENTE: Elaboración propia

De la Tabla 20 se observa que el análisis de varianza, a través de la prueba estadística F, nos da como resultado un p valor de 0,000; por consiguiente, debido a que el valor obtenido es menor a 0,05; la hipótesis nula se rechaza a un nivel de significancia  $\alpha = 5$  por ciento. Esto permite afirmar que si existe regresión lineal entre las concentraciones de material particulado observadas con ambas metodologías.

Finalmente, se aplicó el análisis de regresión lineal a los pares de datos de concentración durante el periodo de muestreo. En la Figura 32 se puede observar una buena respuesta a la relación lineal entre el equipo Hivol – 3000 vs. Partisol 2000H.

Según el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) hallado, el 75,7 por ciento de la variación de los datos es explicado por el modelo de regresión lineal “PARTISOL = -6,784 + 0,8771xHIVOL

( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )". Según el coeficiente de correlación hallado  $r = 0,87$  se puede señalar que el modelo cuenta con una elevada correlación positiva. Asimismo, Levin y Rubin (2004) mencionan que para el uso del análisis de regresión y correlación, las ecuaciones estimadas son válidas y aplicables para el rango dentro del cual se tomó la muestra, por lo que la ecuación de regresión determinada se debe aplicar sobre el intervalo de  $25,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $54,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Figura 32:** Relación entre las concentraciones de  $\text{PM}_{2,5}$  obtenidas con el Hivol – 3000 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el mes de enero de 2019

**FUENTE:** Elaboración propia

En relación al análisis de correlación correspondiente al mes de febrero se cuentan con siete pares de datos de días de muestreo validados coincidentes en ambos equipos. Para determinar si verdaderamente existe regresión lineal entre las concentraciones de  $\text{PM}_{2,5}$  para ambos muestreadores se aplicó la prueba de análisis de varianza lo cual se muestra en la Tabla 21.

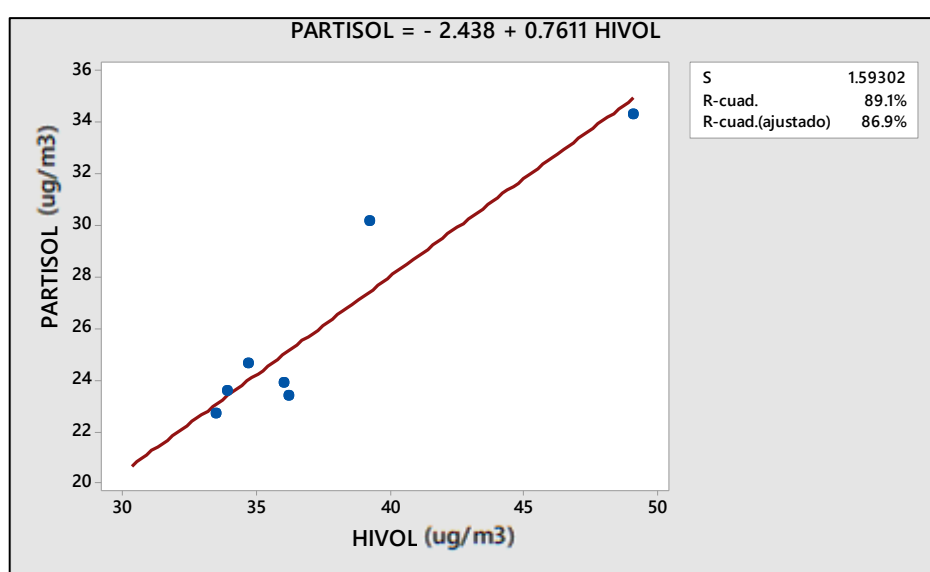
**Tabla 21:** Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Hivol – 3000 vs. Partisol 2000H, para el mes de febrero de 2019

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor p
<b>Regresión</b>	1	103,673	103,673	40,85	0,001
<b>Error</b>	5	12,689	2,538		
<b>Total</b>	6	116,361			

**FUENTE:** Elaboración propia

De la Tabla 21 se observa que el análisis de varianza, a través de la prueba estadística F, nos da como resultado un p valor de 0,001; por consiguiente, debido a que el valor obtenido es menor a 0,05; la hipótesis nula se rechaza a un nivel de significancia  $\alpha = 5$  por ciento. Esto permite afirmar que si existe regresión lineal entre las concentraciones de material particulado observadas con ambas metodologías.

Finalmente, se aplicó el análisis de regresión lineal a los pares de datos de concentración durante el periodo de muestreo. En la Figura 33 se puede observar una buena respuesta a la relación lineal entre el equipo Hivol – 3000 vs. Partisol 2000H.



**Figura 33:** Relación entre las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> obtenidas con el Hivol – 3000 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el mes de febrero de 2019

**FUENTE:** Elaboración propia

Según el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) hallado, el 89,1 por ciento de la variación de los datos es explicado por el modelo de regresión lineal “PARTISOL = -2,438 + 0,7611xHIVOL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )”. Según el coeficiente de correlación hallado  $r = 0,944$  se puede señalar que el modelo cuenta con una elevada correlación positiva. Asimismo, Levin y Rubin (2004) mencionan que para el uso del análisis de regresión y correlación, las ecuaciones estimadas son válidas y aplicables para el rango dentro del cual se tomó la muestra, por lo que la

ecuación de regresión determinada se debe aplicar sobre el intervalo de 30,34  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 49,07  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En relación al análisis de correlación correspondiente al mes de marzo se cuentan con siete pares de datos de días de muestreo validados coincidentes en ambos equipos. Para determinar si verdaderamente existe regresión lineal entre las concentraciones de  $\text{PM}_{2,5}$  para ambos muestreadores se aplicó la prueba de análisis de varianza lo cual se muestra en la Tabla 22.

**Tabla 22:** Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Hivol – 3000 vs. Partisol 2000H, para el mes de marzo de 2019

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>MC</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Regresión</b>	1	38,9252	38,9252	4,85	0,079
<b>Error</b>	5	40,1467	8,0293		
<b>Total</b>	6	79,0719			

FUENTE: Elaboración propia

De la Tabla 22 se observa que el análisis de varianza, a través de la prueba estadística F, nos da como resultado un p valor de 0,079; por consiguiente, debido a que el valor obtenido es mayor a 0,05; la hipótesis nula no se rechaza a un nivel de significancia  $\alpha = 5$  por ciento. Esto permite afirmar que no existe regresión lineal entre las concentraciones de material particulado observadas con ambas metodologías. Por consiguiente, no se justifica el realizar un análisis de regresión lineal a los pares de datos de concentración durante el periodo de muestreo de marzo. Esto se puede deber a que el equipo Hivol – 3000 presentó diversos problemas técnicos que influyeron en el muestreo del  $\text{PM}_{2,5}$  por ejemplo la variación del flujo eléctrico.

El detalle de los cálculos estadísticos obtenidos en esta sección se encuentra en el Anexo 8.

Los cuatro factores hallados se han utilizado en cada una de las observaciones del Hivol – 3000 de manera que para cada uno de los 34 días muestreados validados se tiene cuatro observaciones corregidas (cada una obtenida con cada factor), las ecuaciones de correlación aplicadas a los promedios mensuales se muestran en la Tabla 23. En la Tabla 24 se observa que la diferencia encontrada entre la menor concentración corregida y la mayor concentración corregida para un mismo periodo es menor al 10 por ciento, por lo tanto, se

podría utilizar una única ecuación de corrección para el periodo total de muestreo ya que se cumple con el requisito de que las concentraciones corregidas para un mismo día no difieran en más del 10 por ciento. Sin embargo y como se determinó en la Tabla 22, para los datos de concentración obtenidos en el mes de marzo no existe una correlación lineal entre ambos muestreadores, por lo que no se recomienda aplicar la ecuación de corrección total para dicho mes.

Como se ha podido observar, los coeficientes de correlación halladas con los equipos Hivol – 3000 y Partisol 2000H para el periodo de muestreo de diciembre de 2018 a febrero de 2019, son coherentes con el trabajo realizado por Holsen *et al.* (2007) realizaron comparaciones entre equipos equivalentes (TEOM) y de referencia (Partisol) obteniéndose una alta correlación del 94 por ciento y 97 por ciento. Por otro lado, Chow *et al.* (2016) quienes también utilizaron un equipo Partisol como muestreadores de referencia, obteniendo un  $r = 0,83-0,84$ . Es preciso mencionar que Ibáñez (2008) realizó una comparación entre muestreadores de PM<sub>10</sub> en El Agustino, utilizando los equipos TEOM, STAPLEX, Partisol y Minivol; obteniendo valores de correlación de 0,86 a 0,89. Finalmente, Cai *et al.* (2017) validaron sensores de referencia por dispersión de luz para PM<sub>2,5</sub> comparándolos con bombas SKC (adaptadas con impactadores PM<sub>2,5</sub>) obteniéndose coeficientes de determinación de 0,75 a 0,81.

**Tabla 23: Concentraciones del Hivol – 3000 corregidas a partir de las ecuaciones de regresión halladas por la relación Hivol vs. Partisol**

FECHA	HIVOL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	HIVOL Ecuación Diciembre - Febrero ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	HIVOL Ecuación Diciembre ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	HIVOL Ecuación Enero ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	HIVOL Ecuación Febrero ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PARTISOL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Diciembre	40,34	28,112	28,890	28,598	28,265	28,888
Enero	42,378	29,781	30,682	30,385	29,815	30,384
Febrero	37,463	25,754	26,358	26,074	26,075	26,074
Marzo	42,716	30,059	30,980	30,682	30,073	27,821

FUENTE: Elaboración propia

**Tabla 24: Diferencia entre la menor y mayor observación corregida entre los equipos Hivol - 3000 y Partisol 2000H**

<b>FECHA</b>	<b>Menor Concentración (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Mayor Concentración (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Diferencia (%)</b>
Diciembre	28,112	28,890	2,769
Enero	29,781	30,683	3,026
Febrero	25,754	26,359	2,350
Marzo	30,059	30,980	3,066

**FUENTE:** Elaboración propia

#### **4.4 Relación entre la metodología gravimétrica de bajo volumen (Microvol – 1100) y la metodología gravimétrica de bajo volumen (Partisol 2000H), y determinación de ecuaciones de corrección**

Como se describe en la metodología, para dar cumplimiento al objetivo específico de evaluar la relación entre los equipos muestreadores Microvol - 1100 y Partisol 2000H, así como determinar las ecuaciones de corrección para el equipo Microvol - 1100, durante el periodo de muestreo, se aplicaron pruebas estadísticas de normalidad, análisis de varianza y finalmente análisis de regresión lineal mensuales a los grupos de concentración de  $\text{PM}_{2,5}$  calculados.

Como primer paso se aplicó la prueba de normalidad para los datos de las concentraciones de material particulado fino obtenidas con el Microvol - 1100 y para las concentraciones obtenidas con el Partisol 2000H en los mismos días. La Tabla 25 muestra que el valor de probabilidad p es mayor a 0,05 para ambos casos, por lo que los datos cumplen con la normalidad. Asimismo, se observa que se obtuvieron 30 datos de concentración validados para los mismos días monitoreados por ambos equipos.

**Tabla 25: Resultados de la prueba estadística Ryan Joiner aplicada a los grupos de datos de concentración de  $\text{PM}_{2,5}$  obtenidos con el Microvol - 1100 los mismos días monitoreados con el Partisol 2000H**

<b>Muestreador</b>	<b>Número de datos</b>	<b>Ryan Joiner</b>	<b>p-valor</b>
Microvol - 1100	30	0,982	>0,100
Partisol 2000H	30	0,967	0,070

**FUENTE:** Elaboración propia

Como segundo paso, para determinar si verdaderamente existe regresión lineal entre ambos grupos de datos durante el periodo total de muestreo se aplicó la prueba de análisis de varianza, lo cual se muestra en la Tabla 26.

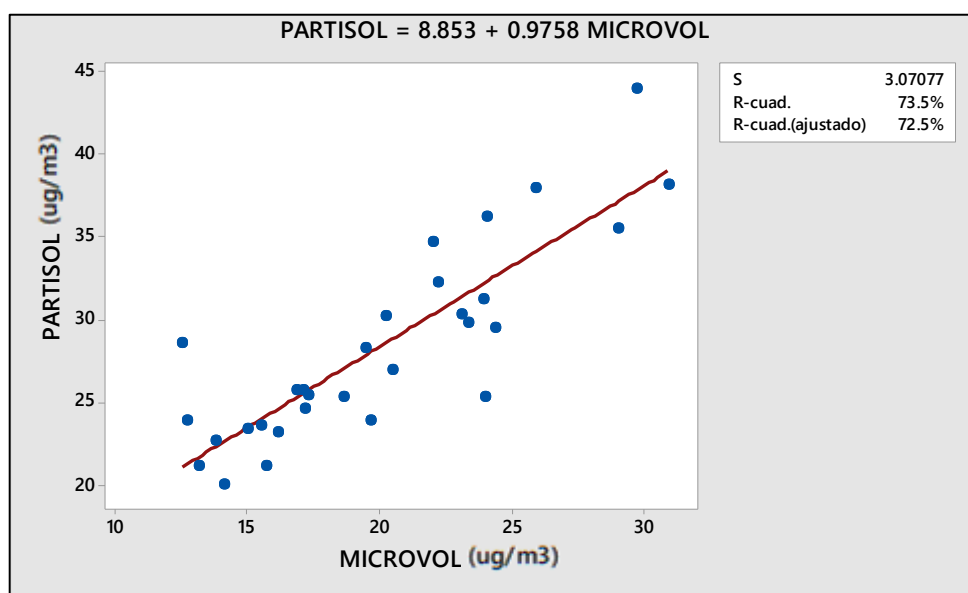
**Tabla 26:** Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Microvol - 1100 vs. Partisol 2000H, para el período de muestreo enero del 2019 a marzo del 2019

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor p
<b>Regresión</b>	1	730,754	730,754	77,50	0,000
<b>Error</b>	28	264,030	9,430		
<b>Total</b>	29	994,784			

FUENTE: Elaboración propia

De la Tabla 26 se observa que el análisis de varianza, a través de la prueba estadística F, nos da como resultado un p valor de 0,000; por consiguiente, debido a que el valor obtenido es menor a 0,05; la hipótesis nula se rechaza a un nivel de significancia  $\alpha = 5$  por ciento. Esto permite afirmar que si existe regresión lineal entre las concentraciones de material particulado observadas con ambas metodologías.

Finalmente, se aplicó el análisis de regresión lineal a los pares de datos de concentración durante el periodo de muestreo. En la Figura 34 se puede observar una buena respuesta a la relación lineal entre el equipo Microvol - 1100 vs. Partisol 2000H.



**Figura 34:** Relación entre las concentraciones de  $PM_{2.5}$  obtenidas con el Microvol - 1100 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el periodo de enero del 2019 a marzo del 2019

FUENTE: Elaboración propia

Según el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) hallado, el 73,5 por ciento de la variación de los datos es explicado por el modelo de regresión lineal “PARTISOL = 8,853 + 0,9758xMICROVOL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )”. Según el coeficiente de correlación hallado  $r = 0,857$  se puede señalar que el modelo cuenta con una elevada correlación positiva. Asimismo, Levin y Rubin (2004) mencionan que para el uso del análisis de regresión y correlación, las ecuaciones estimadas son válidas y aplicables para el rango dentro del cual se tomó la muestra, por lo que la ecuación de regresión determinada se debe aplicar sobre el intervalo de  $12,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $30,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En relación al análisis de correlación correspondiente al mes de diciembre, se cuentan con seis pares de datos de días de muestreo validados coincidentes en ambos equipos. Para determinar si verdaderamente existe regresión lineal entre las concentraciones de  $\text{PM}_{2,5}$  para ambos muestreadores se aplicó la prueba de análisis de varianza lo cual se muestra en la Tabla 27.

**Tabla 27:** Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Microvol - 1100 vs. Partisol 2000H, para el mes de diciembre de 2018

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>MC</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Regresión</b>	1	66,639	66,639	2,73	0,174
<b>Error</b>	4	97,676	24,419		
<b>Total</b>	5	164,315			

FUENTE: Elaboración propia

De la Tabla 27 se observa que el análisis de varianza, a través de la prueba estadística F, nos da como resultado un p valor de 0,174; por consiguiente, debido a que el valor obtenido es mayor a 0,05; la hipótesis nula no se rechaza a un nivel de significancia  $\alpha = 5$  por ciento. Esto permite afirmar que no existe regresión lineal entre las concentraciones de material particulado observadas con ambas metodologías. Por consiguiente, no se justifica el realizar un análisis de regresión lineal a los pares de datos de concentración durante el periodo de muestreo de diciembre. Esto se puede deber a que el equipo Microvol – 1100 presentó diversos problemas técnicos que influyeron en el muestreo del  $\text{PM}_{2,5}$  por ejemplo la variación del flujo eléctrico.



En relación al análisis de correlación correspondiente al mes de enero se cuentan con ocho pares de datos de días de muestreo validados coincidentes en ambos equipos. Para determinar si verdaderamente existe regresión lineal entre las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> para ambos muestreadores se aplicó la prueba de análisis de varianza lo cual se muestra en la Tabla 28.

**Tabla 28:** Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Microvol - 1100 vs. Partisol 2000H, para el mes de enero de 2019

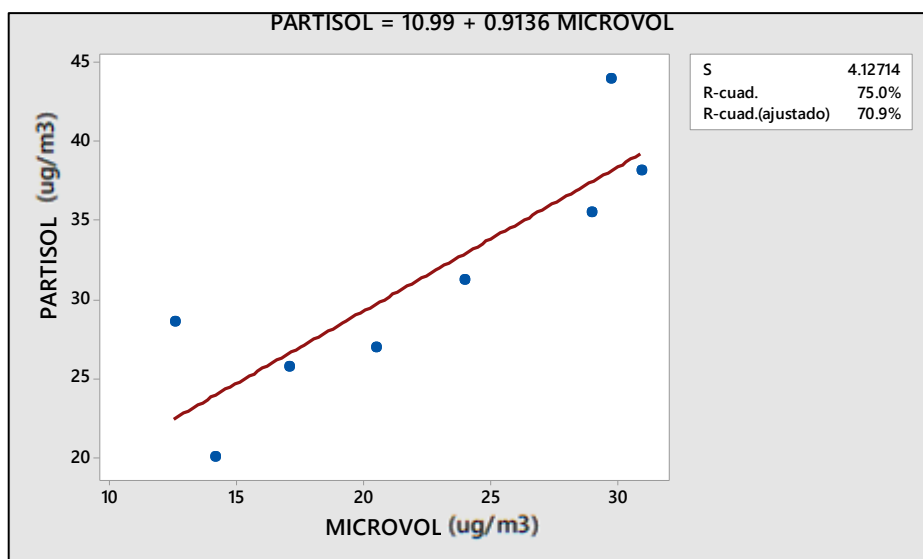
<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>MC</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Regresión</b>	1	307,130	307,130	18,03	0,005
<b>Error</b>	6	102,200	17,033		
<b>Total</b>	7	409,329			

FUENTE: Elaboración propia

De la Tabla 28 se observa que el análisis de varianza, a través de la prueba estadística F, nos da como resultado un p valor de 0,005; por consiguiente, debido a que el valor obtenido es menor a 0,05; la hipótesis nula se rechaza a un nivel de significancia  $\alpha = 5$  por ciento. Esto permite afirmar que si existe regresión lineal entre las concentraciones de material particulado observadas con ambas metodologías.

Finalmente, se aplicó el análisis de regresión lineal a los pares de datos de concentración durante el periodo de muestreo. En la Figura 35 se puede observar una buena respuesta a la relación lineal entre el equipo Microvol – 1100 vs. Partisol 2000H.

Según el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) hallado, el 75,0 por ciento de la variación de los datos es explicado por el modelo de regresión lineal “PARTISOL = 10,99 + 0,9136xMICROVOL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )”. Según el coeficiente de correlación hallado  $r = 0,866$  se puede señalar que el modelo cuenta con una elevada correlación positiva. Asimismo, Levin y Rubin (2004) mencionan que para el uso del análisis de regresión y correlación, las ecuaciones estimadas son válidas y aplicables para el rango dentro del cual se tomó la muestra, por lo que la ecuación de regresión determinada se debe aplicar sobre el intervalo de 12,53  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 30,87  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Figura 35:** Relación entre las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> obtenidas con el Microvol - 1100 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el mes de enero de 2019

**FUENTE:** Elaboración propia

En relación al análisis de correlación correspondiente al mes de febrero se cuentan con ocho pares de datos de días de muestreo validados coincidentes en ambos equipos. Para determinar si verdaderamente existe regresión lineal entre las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> para ambos muestreadores se aplicó la prueba de análisis de varianza lo cual se muestra en la Tabla 29.

**Tabla 29:** Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Microvol - 1100 vs. Partisol 2000H, para el mes de febrero de 2019

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>MC</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Regresión</b>	1	36,492	36,492	17,17	0,006
<b>Error</b>	6	12,754	2,125		
<b>Total</b>	7	49,246			

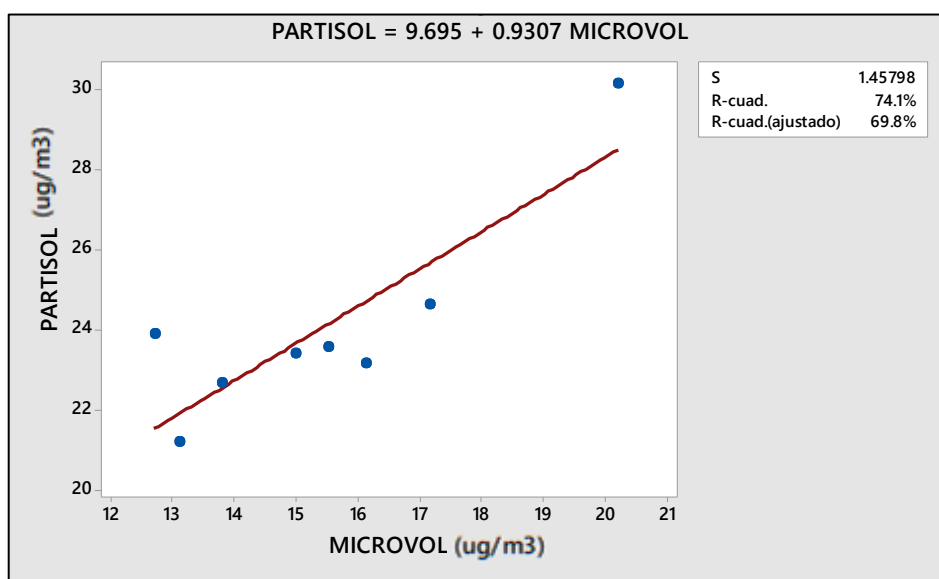
**FUENTE:** Elaboración propia

De la Tabla 29 se observa que el análisis de varianza, a través de la prueba estadística F, nos da como resultado un p valor de 0,006; por consiguiente, debido a que el valor obtenido es menor a 0,05; la hipótesis nula se rechaza a un nivel de significancia  $\alpha = 5$  por ciento. Esto

permite afirmar que si existe regresión lineal entre las concentraciones de material particulado observadas con ambas metodologías.

Finalmente, se aplicó el análisis de regresión lineal a los pares de datos de concentración durante el periodo de muestreo. En la Figura 36 se puede observar una buena respuesta a la relación lineal entre el equipo Microvol - 1100 vs. Partisol 2000H.

Según el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) hallado, el 74,1 por ciento de la variación de los datos es explicado por el modelo de regresión lineal “PARTISOL = 9,695 + 0,9307xMICROVOL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )”. Según el coeficiente de correlación hallado  $r = 0,861$  se puede señalar que el modelo cuenta con una elevada correlación positiva. Asimismo, Levin y Rubin (2004) mencionan que para el uso del análisis de regresión y correlación, las ecuaciones estimadas son válidas y aplicables para el rango dentro del cual se tomó la muestra, por lo que la ecuación de regresión determinada se debe aplicar sobre el intervalo de  $12,69 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $20,21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Figura 36:** Relación entre las concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  obtenidas con el Microvol - 1100 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el mes de febrero de 2019

**FUENTE:** Elaboración propia

En relación al análisis de correlación correspondiente al mes de marzo se cuentan con ocho pares de datos de días de muestreo validados coincidentes en ambos equipos. Para

determinar si verdaderamente existe regresión lineal entre las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> para ambos muestreadores se aplicó la prueba de análisis de varianza lo cual se muestra en la Tabla 30.

**Tabla 30:** Análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión Microvol - 1100 vs. Partisol 2000H, para el mes de marzo de 2019

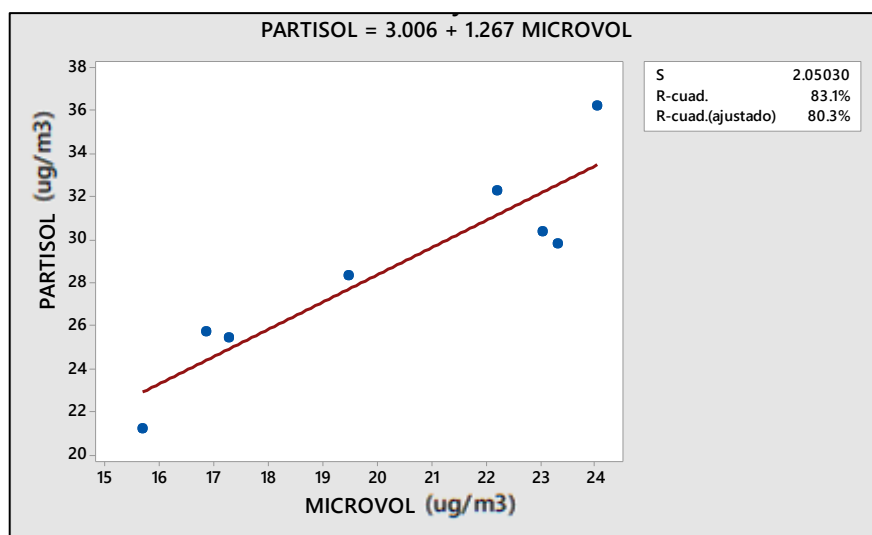
<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>MC</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Regresión</b>	1	123,784	123,784	29,45	0,002
<b>Error</b>	6	25,222	4,204		
<b>Total</b>	7	149,006			

FUENTE: Elaboración propia

De la Tabla 30 se observa que el análisis de varianza, a través de la prueba estadística F, nos da como resultado un p valor de 0,002; por consiguiente, debido a que el valor obtenido es menor a 0,05; la hipótesis nula se rechaza a un nivel de significancia  $\alpha = 5$  por ciento. Esto permite afirmar que si existe regresión lineal entre las concentraciones de material particulado observadas con ambas metodologías.

Finalmente, se aplicó el análisis de regresión lineal a los pares de datos de concentración durante el periodo de muestreo. En la Figura 37 se puede observar una buena respuesta a la relación lineal entre el equipo Microvol - 1100 vs. Partisol 2000H.

Según el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) hallado, el 83,1 por ciento de la variación de los datos es explicado por el modelo de regresión lineal “PARTISOL = 3,006 + 1,267xMICROVOL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )”. Según el coeficiente de correlación hallado  $r = 0,912$  se puede señalar que el modelo cuenta con una elevada correlación positiva. Asimismo, Levin y Rubin (2004) mencionan que para el uso del análisis de regresión y correlación, las ecuaciones estimadas son válidas y aplicables para el rango dentro del cual se tomó la muestra, por lo que la ecuación de regresión determinada se debe aplicar sobre el intervalo de 39,06  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 48,15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Figura 37:** Relación entre las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> obtenidas con el Microvol - 1100 y las obtenidas con el Partisol 2000H, para el mes de marzo de 2019

FUENTE: Elaboración propia

El detalle de los cálculos estadísticos obtenidos en esta sección se encuentra en el Anexo 9.

Los cuatro factores hallados se han utilizado en cada una de las observaciones del Microvol - 1100 de manera que para cada uno de los 30 días muestreados validados se tiene cuatro observaciones corregidas (cada una obtenida con cada factor), las ecuaciones de correlación aplicadas a los promedios mensuales se muestra en la Tabla 31.

**Tabla 31: Concentraciones del Microvol - 1100 corregidas a partir de las ecuaciones de regresión halladas por la relación Hivol vs. Partisol**

FECHA	MICROVOL (µg/m³)	MICROVOL	MICROVOL	MICROVOL	MICROVOL	PARTISOL (µg/m³)
		Ecuación Enero - Marzo (µg/m³)	Ecuación Enero (µg/m³)	Ecuación Febrero (µg/m³)	Ecuación Marzo (µg/m³)	
Diciembre	22,402	30,712	31,456	30,544	31,388	29,451
Enero	22,197	30,512	31,269	30,353	31,129	31,270
Febrero	15,439	23,918	25,095	24,064	23,567	24,064
Marzo	20,224	28,587	29,466	28,517	28,629	28,630

FUENTE: Elaboración propia

En la Tabla 32 se observa que la diferencia encontrada entre la menor concentración corregida y la mayor concentración corregida para un mismo periodo es menor al 10 por ciento, por lo tanto, se podría utilizar una única ecuación de corrección para el periodo total de muestreo ya que se cumple con el requisito de que las concentraciones corregidas para un mismo día no difieran en más del 10 por ciento. Asimismo, y como se determinó en la Tabla 27, para los datos de concentración obtenidos en el mes de diciembre no existe una correlación lineal entre ambos muestreadores.

**Tabla 32: Diferencia entre la menor y mayor observación corregida entre los equipos Microvol – 1100 y Partisol 2000H**

<b>FECHA</b>	<b>Menor Concentración (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Mayor Concentración (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Diferencia (%)</b>
Diciembre	30,544	31,456	2,985
Enero	30,353	31,269	3,015
Febrero	23,567	25,095	6,484
Marzo	28,517	29,466	3,328

**FUENTE:** Elaboración propia

#### **4.5 Análisis del costo económico para el muestreo del material particulado fino ( $\text{PM}_{2,5}$ )**

Con el objetivo de realizar una evaluación técnica y económica de los equipos e insumos utilizados en el presente trabajo de investigación, necesaria para realizar un monitoreo para  $\text{PM}_{2,5}$ , se solicitaron cotizaciones a empresas comercializadoras ambientales debidamente registradas en SUNAT.

En relación a los equipos que miden material particulado fino, se obtuvieron cotizaciones para los equipos Hivol – 3000, Microvol – 1100; para el caso del equipo Partisol 2000H, debido a que el modelo del muestreador ha ido cambiando con el tiempo, se trabajó con la versión actual de un equipo validado por la USEPA (2019): Partisol 2000i-BV marca Thermo Scientific. La descripción técnica y económica se muestra en la Tabla 35.

**Tabla 33: Características técnicas y económicas de los equipos Microvol – 1100, Partisol 2000i-BV y Hivol - 3000**

Característica	Muestreador		
	Microvol - 1100	Partisol 2000i - BV	Hivol - 3000
Modelo	Microvol - 1100	Partisol 2000i - BV	Hivol - 3000
Marca	Ecotech	Thermo Scientific	Ecotech
Rango del flujo volumétrico	1 – 4,5 L/min	5 - 18 L/min	750 - 1600 L/min
Descarga de datos	Si	Si	Si
Rango de medida de temperatura	0 - 45° C	-40 - 50°C	0 - 50 °C
Rango de medida de la presión	600 - 900 mmHg	300 - 900 mmHg	600 - 900 mmHg
Flujo estandarizado a condiciones normales	Si	Si	Si
Peso	3,75 kg	28 kg	45 kg
Dimensiones (largo x ancho x alto)	170x170x300 mm	410x610x330 mm	380x380x1200 mm
Almacenamiento	150 datos	86 días continuos	150 datos
Precio (S/.)	25,000.00	96,000.00	70,000.00

**FUENTE:** Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 33, de los tres equipos evaluados se observa que los equipos candidatos Hivol – 3000 y Microvol – 1100 son más económicos respecto al equipo referenciado por la USEPA (Partisol 2000i - BV). Asimismo, se evidencia que los estos equipos cumplen con las características del equipo referencial como son: la posibilidad de descargar datos del equipo, el rango de medida de temperatura, estandarización del flujo de succión a condiciones estándar, frecuencia de mantenimiento y frecuencia de la calibración. Por otro lado, la Tabla 34 muestra las características de los distintos filtros empleados en el presente trabajo de investigación. Si bien Azzi *et al.* (2017) indican que el material más usado para determinaciones gravimétricas de material particulado es el teflón, debido a su baja sensibilidad a la humedad durante el proceso de pesado; sin embargo, existen alternativas de filtros igual de válidas para el muestreo del PM<sub>2,5</sub> como lo son la fibra de

vidrio que puede retener una alta concentración de material particulado y la fibra de cuarzo que se mantiene estable a valores altos de temperatura.

**Tabla 34: Características técnicas y económicas de los tipos de filtro utilizados en el presente trabajo de investigación**

Característica	Tipo de filtro		
Marca	Whatman	Whatman	Whatman
Muestreador	Hivol - 3000	Partisol 2000H	Microvol - 1100
Tipo de filtro	Fibroso	Membranoso	Fibroso
Material	Fibra de vidrio	Teflón	Fibra de cuarzo
Ventajas	Alta capacidad de retención de material particulado	Inerte a transformaciones químicas y a la humedad	Estable a temperaturas altas (800°C)
Limitaciones	Altos niveles de sodio, calcio y silicio en el filtro blanco	No permite analizar carbono	Sensible a la humedad
Aplicación	Filtro estándar para el muestreo de aire de alto volumen	Análisis de masa y elemental de trazas	Análisis químico de absorción atómica, cromatografía iónica y determinación de carbono
Dimensión	8x10 pulgadas	47 mm	47 mm
Cantidad	100 unidades	50 unidades	100 unidades
Precio (S/.)	836.05	1,735.60	720.30

**FUENTE:** Adaptado de Lee *et al.* (2011)

Asimismo, la Tabla 34 muestra que, los filtros del tipo fibroso: vidrio y cuarzo, son más económicos respecto al filtro membranoso de teflón. Esto se puede explicar debido a que los filtros fibrosos presentan un espesor aproximado de 0,15 – 0,5 m.m. lo cual es mucho mayor a los filtros membranosos cuyo espesor aproximado es de 0,02 - 10µm. (Lee *et al.*, 2011), esto garantiza una mayor retención del material particulado.



## V. CONCLUSIONES

### 5.1 Del análisis y evaluación horaria, diaria y mensual del PM<sub>2,5</sub> en Lima Este y el campus de la UNALM

- a) La variación horaria del PM<sub>2,5</sub> en la Embajada de los Estados Unidos presenta dos picos máximos durante el día (10 horas y 22 horas), los que coinciden con el alto flujo vehicular circundante a la zona de monitoreo.
- b) A nivel diario, para la zona de Lima Este y el campus de la UNALM, los máximos valores se registran los días martes a sábado, por otro lado los mínimos valores se presentan los días domingo y lunes. Asimismo, no se superan los valores límites del ECA - Aire para PM<sub>2,5</sub> (50 µg/m<sup>3</sup>), lo que indica una calidad de aire buena a moderada.
- c) A nivel mensual, los máximos valores se registran los meses de diciembre y enero para la zona de Lima Este. Por otro lado, para el campus de la UNALM el valor mínimo de concentración se registra para el mes de febrero. Finalmente, los valores registrados de PM<sub>2,5</sub> superan los valores límites anuales del ECA - Aire para (25 µg/m<sup>3</sup>), de manera referencial.

### 5.2 Del análisis y evaluación de la relación entre la concentración del PM<sub>2,5</sub> con las variables meteorológicas en el área de estudio

- a) El nivel de PM<sub>2,5</sub> en el área de estudio tiene una correlación negativa de -0,606 (Microvol-1100) con la temperatura ambiental.
- b) El nivel de PM<sub>2,5</sub> en el área de estudio tiene una correlación positiva de 0,453 (Microvol - 1100) con la humedad relativa.

- c) El nivel de  $PM_{2,5}$  en el área de estudio tiene una correlación negativa de -0,130 (Hivol-3000) con la velocidad del viento.
- d) El nivel de  $PM_{2,5}$  en el área de estudio tiene una correlación negativa de -0,332 (Microvol-1100) con la radiación solar.

### **5.3 Del análisis y evaluación de la ecuación de corrección para el $PM_{2,5}$ entre los muestreadores Hivol – 3000 y Partisol 2000H, en el área de estudio.**

- a) Si existe regresión lineal entre las concentraciones de  $PM_{2,5}$  observadas en la relación Hivol – 3000 vs. Partisol 2000H, encontrándose una correlación positiva significativa, con un coeficiente de determinación del 76,4 por ciento.
- b) A partir del análisis mensual se ha determinado las siguientes ecuaciones de corrección:  $PARTISOL = -6,597 + 0,8797 \times HIVOL$  ( $\mu g/m^3$ ) para el mes de diciembre y válida para el intervalo de  $30,86 \mu g/m^3$  a  $48,87 \mu g/m^3$ ;  $PARTISOL = -6,784 + 0,8771 \times HIVOL$  ( $\mu g/m^3$ ) para el mes de enero y válida para el intervalo de  $25,43 \mu g/m^3$  a  $54,96 \mu g/m^3$ ;  $PARTISOL = -2,438 + 0,7611 \times HIVOL$  ( $\mu g/m^3$ ) para el mes de febrero y válida para el intervalo de  $30,34 \mu g/m^3$  a  $49,07 \mu g/m^3$ . Se recomienda utilizar una única ecuación de corrección:  $PARTISOL = -4,947 + 0,8195 \times HIVOL$  ( $\mu g/m^3$ ) para el periodo total de muestreo (válida para el intervalo de  $25,43 \mu g/m^3$  a  $54,95 \mu g/m^3$ ) ya que se cumple con el requisito de que las concentraciones corregidas con las tres ecuaciones para un mismo día no difieren en más del 10 por ciento.

### **5.4 Del análisis y evaluación de la ecuación de corrección para el $PM_{2,5}$ entre los muestreadores Microvol - 1100 y Partisol 2000H, en el área de estudio.**

- a) Si existe regresión lineal entre las concentraciones de  $PM_{2,5}$  observadas en la relación Microvol - 1100 vs. Partisol 2000H, encontrándose una correlación positiva significativa, con un coeficiente de determinación del 73,5 por ciento.
- b) A partir del análisis mensual se ha determinado las siguientes ecuaciones de corrección:  $PARTISOL = 10,99 + 0,9136 \times MICROVOL$  ( $\mu g/m^3$ ) para el mes de enero y válida para el intervalo de  $12,53 \mu g/m^3$  a  $30,87 \mu g/m^3$ ;  $PARTISOL = 9,695 + 0,9307 \times MICROVOL$  ( $\mu g/m^3$ ) para el mes de febrero y válida para el intervalo de

12,69  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 20,21  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $\text{PARTISOL} = 3,006 + 1,267 \times \text{MICROVOL} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$  para el mes de marzo y válida para el intervalo de 15,68  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 24,03  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Se recomienda utilizar una única ecuación de corrección:  $\text{PARTISOL} = 8,853 + 0,9758 \times \text{MICROVOL} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$  para el periodo total de muestreo (válida para el intervalo de 12,52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 30,87  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ya que se cumple con el requisito de que las concentraciones corregidas con las tres ecuaciones para un mismo día no difieren en más del 10 por ciento.

### **5.5 Del análisis de costos económicos, para un muestreo del $\text{PM}_{2,5}$ utilizando los equipos muestreadores del presente trabajo.**

- a) Los muestreadores Microvol – 1100 y Hivol – 3000, son más económicos y tienen especificaciones técnicas similares al equipo Partisol 2000i – BV.
  
- b) Los filtros del tipo fibroso (vidrio y cuarzo) son más económicos que el filtro membranoso de teflón; asimismo, para un muestreo de cuantificación de material particulado se recomienda el uso del filtro de vidrio. Por otro lado, de acuerdo al objetivo del muestreo se recomienda usar un tipo de material específico.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- a) Se recomienda contar con un estudio comparativo entre los muestreadores utilizados en el presente trabajo de investigación durante un periodo anual, con el objetivo de evaluar ecuaciones de corrección para cada estación del año, así como su correlación con las variables meteorológicas.
- b) Se recomienda realizar estudios comparativos en entornos con condiciones meteorológicas distintas a la zona de estudio, con el objetivo de proponer los muestreadores comerciales Hivol – 3000 y Microvol – 1100 como equipos de referencia o equivalentes para evaluar  $PM_{2.5}$ . Así como la comparación de sensores de calidad de aire bajo costo junto al equipo Partisol 2000H normado por la USEPA.
- c) Para el manejo de los equipos utilizados en el presente trabajo, se recomienda contar con asesoría técnica con el fin de evitar errores durante el muestreo del material particulado fino.
- d) Incentivar políticas nacionales para promover el uso de equipos alternativos a los establecidos por la USEPA, con el objetivo de desarrollar tecnologías de bajo costo, alta precisión y de fácil manejo, para evaluar el estado de la calidad del aire.

## I. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta, H., Campos, A., Carrillo, J., Gómez, R., & Ramírez, E. (2015). Evaluación del desempeño del método de alto volumen para la medición de partículas menores a 10 micras. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 31(1), 79-88.
2. Ainhoa, I., Gil, J., Menéndez, M., Ortega, L., & Sánchez, M. (2006). *Estudio de los niveles de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> en un área urbana con influencia industrial siderometalúrgica (Basauri, Vizcaya)*. España: Gobierno Vasco.
3. Alarcón, N., Dawidowski, L., & Sánchez-Ccoyllo, O. (2014). *Estimación de emisiones vehiculares en Lima Metropolitana - Informe Final*. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
4. Amaral, S., Costa, M., de Carvalho, J., & Pinheiro, C. (2015). An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments. *Atmosphere*, 6, 1327-1345.
5. Azzi, M., Bai, Z., & Han, J. (2017). Insights into Measurements of Ambient Air PM<sub>2,5</sub> in China. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 13, 1-9.
6. Beaver, M., Duvall, R., Hall, E., Kaushik, S., Long, R., Solomon, P., y otros. (2014). Integrating Sensor Monitoring Technology into the Current Air Pollution Regulatory Support Paradigm: Practical Considerations. *American Journal of Environment Engineering*, 4(6), 147-154.
7. Bell, M., Dominici, F., Samet, J. (2004). Time-series studies of particulate matter. *Annual Review of Public Health*, 25, 247-280.
8. Benítez, D., Grajales, V., Higueta, H., Pérez, L., Tabón, J., Takahashi, H., y otros. (2010). *Evaluación de los niveles de contaminación en las zonas urbanas del valle de Aburrá: caracterización y análisis de la contribución de fuentes de material particulado PM<sub>2,5</sub> en tres (03) zonas del valle de Aburrá*. Medellín.
9. Bi, X., Dai, Q., Feng, Y., Liu, B., Mei, R., Sui, B., y otros. (2015). Chemical composition and source apportionment of ambiente PM<sub>2,5</sub> during the non-heating period in Tain, China. *Atmospheric Research*, 170, 23-33 .

10. Cai, J., Cai, Y., Chen, F., Chen, R., Fan, S., Kan, H., y otros. (2017). Validation of a light-scattering PM<sub>2.5</sub> sensor monitor based on the long-term gravimetric measurements in field tests. *Plos One*, 12(11), 1-13.
11. Calvo, D., Molina, M., & Salvachúa, J. (2001). *Ciencias de la tierra y del medio ambiente*. Mc Graw Hill: España.
12. Canchala, T., & Silva, J. (2013). Variación espacial y temporal de concentraciones de PM<sub>10</sub> en el área urbana de Santiago de Cali, Colombia . *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*. 12, 129-141.
13. Cao, C., Fang, J., Jiang, J., Jiang, W., Lang, J., Tian, G., y otros. (2014). Inhalable microorganisms in Beijing's PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> pollutants during a severe smog event. *Environmental science and technology*, 48, 1499-1507.
14. Caussin, C., Escolano, S., Mustafic, H., & Perier, M. (2012). Main air pollutants and myocardial infarction a systematic review and meta-analysis . *The journal of the american medical association*, 307 (7), 713-721.
15. Chantara, S., Hsiao, T., Hsu, N., Lin, N., Loftus, A., Sayer, A., y otros. (2014). Interactions between biomass-burning aerosols and clouds over Southeast Asia: Current status, challenges, and perspectives. *Environmental Pollution*, 195, 292- 307.
16. Chow, J., Hsu, Y., Percy, K., Wang, X., & Watson, J. (2016). Collocated comparisons of continuous and filter-based PM<sub>2.5</sub> measurements at Fort McMurray, Alberta, Canada. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66, 329-339.
17. Comité de Gestión Iniciativa Limpia Lima – Callao. (2004). *I Plan Integral de Saneamiento Atmosférico para Lima* . Callao.
18. Congreso Constituyente Democrático. (1993). *Constitución Política del Perú*. Lima, Perú.
19. Consejería de Infraestructuras, Ordenación Del Territorio y Medio Ambiente. (2018). *Orden de 26 de enero de 2018: Expediente 2017/SCA0866*. Obtenido de <https://www.asturias.es/medioambiente/articulos/ficheros/20180126%20Orden%20Directora%20Gral.%20Preveni%C3%B3n%20y%20Control%20Ambiental.pdf>
20. Cuesta, O., González, Y., Quintero, A., Rodríguez, D., & Sánchez, A. (2015). Variación de la estabilidad y altura de la capa de mezcla en la ciudad de Pinar del Río: Su relación con condiciones sinópticas. *Revista Brasileira de Meteorología*, 30 (1), 1-15.

21. Davis, M., Herrick, R., Jiang, H., Levy, J., Smith, T., & Zhu, Y. (2011). Comparing gravimetric and Real time sampling of PM<sub>2,5</sub> concentrations inside trucks cabins. *National Institute of Health* 8(11), 662-672.
22. DIGESA (Dirección General de Salud Ambiental). (2000). *Estudio de saturación: Informe de verano, resultados de la primera campaña de medición de la calidad del aire en el área metropolitana de Lima y Callao*. Perú.
23. DIGESA (Dirección General de Salud Ambiental). (2005). *Protocolo de monitoreo de la calidad de aire y gestión de datos*. Perú.
24. Dockery, D., & Pope III, C. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56, 709-742.
25. Eatough, D., Eatough, N., Fiet, K., Long, R., Mangelson, N., Pope, C., y otros. (2003). The measurement of PM<sub>2,5</sub> including semi-volatile components, in the EMPACT program: results from the Salt Lake City Study. *Atmospheric Environment*, 37 (11), 4407-4417.
26. Frampton, M., & Utell, M. (2000). Acute health effects of ambient air pollution: the ultrafine particle hypothesis. *Journal of Aerosol Medicine*, 13(4), 355–359.
27. Freyle, E., Pérez, J., & Rojano, R. (2012). Effect of relative humidity in determining PM<sub>10</sub> using a DataRam 4 in coastal region of Colombia. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 35 (2), 1-9.
28. Gao, G., Lun, X., Sun, F., Thanh, N., & Yu, X. (2015). Different Concentrations of TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, and PM<sub>1</sub> of Several Urban Forest Types in Different Seasons. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24 (6), 2387-2395.
29. García, S., Pérez, R., & Pinado, O. (2013). *Estudio anual de la composición orgánica, del PM<sub>2,5</sub> en Chapería*. Gobierno de España.
30. Gemmill, D., McElroy, F., Noble, C., Peters, T., Vanderpool, R., & Wiener, R. (2001). Federal reference and equivalent methods for measuring fine particulate matter. *Aerosol science & technology*, 34, 457-464.
31. Holsen, T., Hopke, P., Lee, J., & Polissar, A. (2007). Evaluation of continuous and filterbased methods for measuring PM<sub>2,5</sub> mass concentration. *Aerosol Science and Technology* 39(4), 290-303.
32. Hujia, Z., Lin, W., Ran, T., Quanliang, C., & Yang, L. (2015). Variations in PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> and PM<sub>1,0</sub> in an Urban Area of the Sichuan Basin and Their Relation to Meteorological Factors. *Atmosphere*, 6, 150-163.

33. Ibáñez, L. (2008). *Comparación entre las metodologías de muestreo equivalentes y de referencia del material particulado atmosférico, en la ciudad de Lima*. Lima: Universidad Nacional Agraria la Molina .
34. INACAL (Instituto Nacional de Calidad). (2017). *Norma Técnica Peruana NTP 900.069.2017: Método de referencia para la determinación de material particulado fino como PM<sub>2,5</sub> en la atmósfera*. Lima, Perú.
35. INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). (2018). *Directorio nacional de centros poblados – Censos nacionales 2017: XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas*. Perú: s/e.
36. Instituto Nacional de Ecología. (2011). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM<sub>2,5</sub>*. México.
37. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2017). *Correspondencia entre las metodologías manual y automática para la medición de partículas suspendidas: Primera etapa (Informe final)*. México.
38. IQAir AirVisual. (2018). *2018 world air quality report – región & city PM<sub>2,5</sub> ranking*. Obtenido de <https://www.airvisual.com/world-most-polluted-cities/world-air-quality-report-2018-en.pdf>
39. Jiao, Z., Li, Z., Lu, S., Luan, Q., Shao, L., Wang, F., y otros. (2007). Mineralogy of Inhalable Particulate Matter (PM<sub>10</sub>), in the Atmosphere of Beijing, China. *Journal Water Air Soil Pollution*, 186, 129-137.
40. Jimenez, J. (2016). *Altura de la Capa de Mezcla en un área urbana, montañosa y tropical. Caso de estudio: Valle de Aburrá (Colombia)*. Colombia: Universidad de Antioquía.
41. Kouyoumdjian, H., & Saliba, N. (2006). Mass concentration and ion composition of coarse and fine particles in an urban area in Beirut: effect of calcium carbonate on the absorption of nitric and sulfuric acids and the depletion of chloride. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 1865-1877.
42. Lee, K., Leith, D., Mukund, R., & Raynor, P. (2011). Sampling and Analysis Using Filters. *Aerosol Measurement, John Wiley & Sons, Inc*, 107-128.
43. Leiva, M., Molina, C., Norabuena, M., Rojas, J., Silva, J., & Toro, R. (2017). Particulate matter levels in a South American megacity: the metropolitan area of Lima Callao, Peru. Spring International Publishing. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 365.



44. Levin, R., & Rubin, D. (2004). *Estadística para administración y economía*. México: Editorial Pearson.
45. Llanos, C. (2017). *Análisis de la composición química del material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) en el aire ambiental de la UNALM*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
46. Macintosh, D., Williams, P., & Yanosky, J. (2002). A comparison of two direct-reading aerosol monitors with the federal reference method for PM<sub>2.5</sub> in indoor air. *Atmospheric Environment*, 36, 107–113.
47. MINAM (Ministerio del Ambiente). (2005). Ley N° 28611: Ley General del Ambiente. Lima, Perú.
48. MINAM (Ministerio del Ambiente). (2016). Resolución Ministerial N° 181-2016-MINAM: Establecen el índice de Calidad del Aire – INCA y crean el Sistema de Información de Calidad del Aire – INFO AIRE PERÚ. Lima, Perú.
49. MINAM (Ministerio del Ambiente). (2017). Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM: Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen disposiciones complementarias. Lima, Perú.
50. MINAM (Ministerio del Ambiente). (2019). *Versión preliminar: Diagnóstico de la gestión de la calidad ambiental del aire de Lima y Callao*. Lima, Perú.
51. Ministerio del Medio Ambiente. (2016). *Guía de calidad del aire y educación ambiental*. Obtenido de <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/Guia-para-Docentes-Sobre-Calidad-del-Aire-003.pdf>
52. Murriel, F. (2016). *Determinación del nivel de contaminación atmosférica por PM<sub>2.5</sub> en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
53. Ordóñez, C., & Sánchez, O. (2016). *Evaluación de la Calidad del Aire en Lima Metropolitana*. Obtenido de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01403SENA-7.pdf>
54. ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2016). *Open Working Group on Sustainable Development Goals*. Obtenido de <https://sustainabledevelopment.un.org/#>
55. OEA (Organización de los Estados Americanos). (1988). *Protocolo adicional a la Convención Interamericana sobre los Derechos Humanos en materia de derechos económicos, sociales y culturales, "Protocolo de San Salvador"*. San Salvador. Obtenido de <https://www.oas.org/juridico/spanish/Tratados/a-52.html>

56. OEA (Organización de los Estados Americanos). (1997). *Informe sobre la Situación de los Derechos Humanos en Ecuador*. Obtenido de <http://www.cidh.org/countryrep/Ecuador-sp/indice.htm>
57. Orozco, J., & Quijano, A. (2005). Monitoreo de material particulado-fracción respirable (PM<sub>2,5</sub>) en Pamplona (Colombia). *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 3(2), 1- 11.
58. Pacsi, S. (2016). Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> en Lima Metropolitana. *Anales Científicos, Universidad Nacional Agraria La Molina*, 77 (2), 273-283.
59. Pedroza, J., & Tamayo, R. (2000). *Red de vigilancia de la calidad de aire en Lima y Callao*. Lima: s/e.
60. Prueksasit, T., Sahanavi, N., & Tantrakarnapa, K. (2018). Relationship between PM<sub>10</sub> and PM<sub>2,5</sub> levels in high-traffic area determined using path analysis and linear regression. *Journal of Environmental Sciences*, 69, 105-114.
61. Pulgar, J. (2014). Las ocho regiones naturales. *Revista da Rede Brasileira de Historia da Geografia e Geografia Histórica*, 3, 1-17.
62. Quiñones, H. (2016). *Producción de abono líquido acelerado con heces de alpaca, lactosuero bovino y melaza de caña mediante fermentación homoláctica*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería Ambiental.
63. SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). (2018). *Boletín mensual: Vigilancia de la Calidad del Aire en Lima Metropolitana*. Perú: s/e.
64. SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). (2019). *Boletín mensual: Vigilancia de la Calidad del Aire en Lima Metropolitana*. Perú: s/e.
65. Shaughnessy, W., Trump, D., & Venigalla, M. (2015). Health effects of ambient levels of respirable particulate matter (PM) on healthy, young-adult population. *Atmospheric Environment*, 123, 102-111.
66. Suh, H., & Wilson, W. (1997). Fine Particles and Coarse Particles: Concentration Relationships Relevant to Epidemiologic Studies. *Journal of the Air & Waste Management Association* 47(12), 1238-1249.
67. USEPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). (1996). *Air Quality Criteria for Particulate Matter*. Washington DC, Estados Unidos de América.
68. USEPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). (2006). *40 CFR (Code of Federal Regulations), Appendix L to Part 50. Reference Method for the*

*Determination of Fine Particulate Matter as PM<sub>2,5</sub> in the Atmosphere*. Estados Unidos de América.


69. USEPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). *40 CFR (Code of Federal Regulations), Subpart C to Part 53. Procedures for determining comparability between candidate methods and reference methods*. Estados Unidos de América.
70. USEPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). (2016). *Quality assurance guidance document 2.12: Monitoring PM<sub>2,5</sub> in ambient air using designated reference or Class I Equivalent methods*. Estados Unidos de América.
71. USEPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). (2018). *Particulate matter (PM) basics*. Obtenido de <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>
72. WHO (Organización Mundial de la Salud). (2006). *Air Quality Guidelines: Global update 2005: Particulate matter, Ozone, Nitrogen dioxide and Sulfur Dioxide. Report on a working group*. Alemania.
73. WHO (Organización Mundial de la Salud). (2006). *Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease*. Alemania.

## VIII. ANEXOS

**Anexo 1:** Frecuencia y cronograma de monitoreo.

CRONOGRAMA DE MUESTREO 2018 - 2019							
	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO
Diciembre						1	2
	3	4	5	6	7	8	9
	10	11	12	13	14	15	16
	17	18	19	20	21	22	23
	24	25	26	27	28	29	30
	31						
Enero		1	2	3	4	5	6
	7	8	9	10	11	12	13
	14	15	16	17	18	19	20
	21	22	23	24	25	26	27
	28	29	30	31			
Febrero					1	2	3
	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17
	18	19	20	21	22	23	24
	25	26	27	28			
Marzo					1	2	3
	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17
	18	19	20	21	22	23	24
	25	26	27	28	29	30	31

## Anexo 2: Cadena de custodia

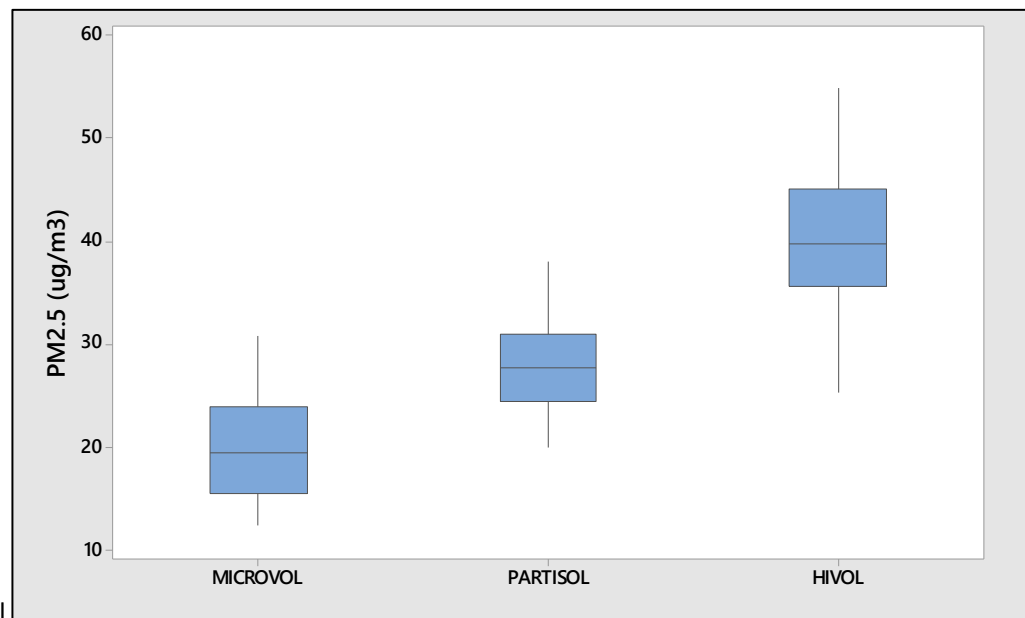
			
CADENA DE CUSTODIA PARA PM2.5 EN CALIDAD DE AIRE			
HI VOL	<input type="text"/>	PARTISOL	<input type="text"/>
MICRO VOL	<input type="text"/>	FILTRO:	<input type="text"/>
Fecha de inicio:	<input type="text"/>	Hora de inicio:	<input type="text"/>
Fecha de término:	<input type="text"/>	Hora de término:	<input type="text"/>
Temperatura ambiental:	Inicial (°C):	<input type="text"/>	Final (°C): <input type="text"/>
Presión ambiental:	Inicial (mmHg):	<input type="text"/>	Final (mmHg): <input type="text"/>
<b>DEL FILTRO UTILIZADO</b>			
Peso inicial (mg):	<input type="text"/>	Peso final (mg):	<input type="text"/>
<b>DEL FLUJO VOLUMÉTRICO</b>			
Volumen muestreado (m <sup>3</sup> ):	<input type="text"/>	Tiempo de funcionamiento (hr):	<input type="text"/>
Observaciones	<input type="text"/>		

FUENTE: Elaboración propia

**Anexo 3:** Concentraciones validadas de  $PM_{2,5}$  obtenidas con los muestreadores Hivol – 3000, Microvol – 1100 y Partisol 2000H

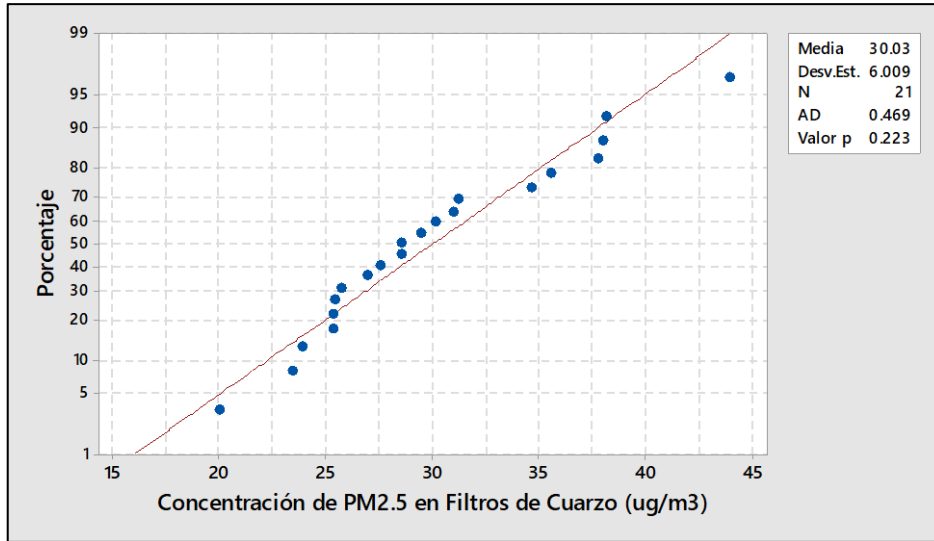
**Tabla 1:** Promedio de concentraciones validadas de  $PM_{2,5}$  obtenidas durante el periodo de muestreo

Equipo	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
<b>Microvol-1100</b>	22,402	22,197	15,439	20,224
<b>Partisol 2000H</b>	28,737	30,780	25,452	28,980
<b>Hivol-3000</b>	39,286	41,074	36,957	42,878

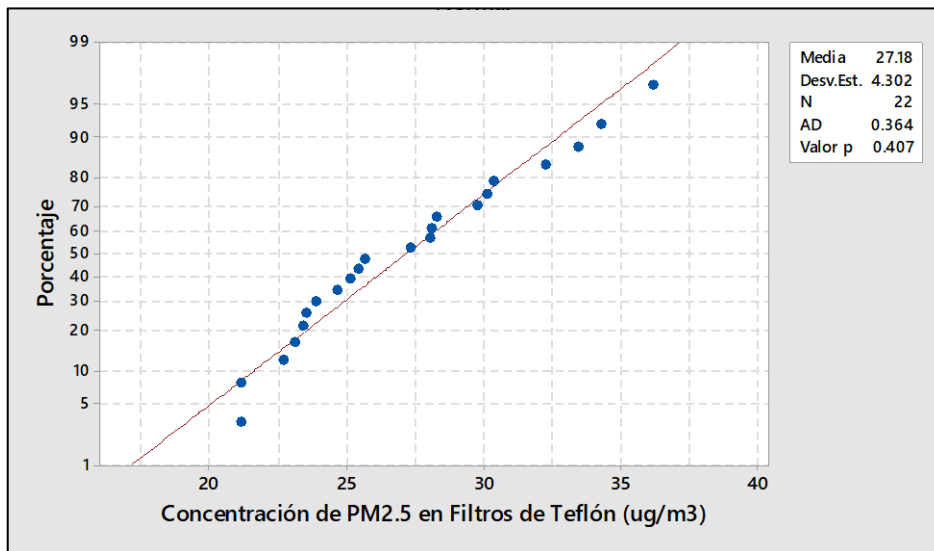


**Figura 1:** Diagrama de caja de las concentraciones de  $PM_{2,5}$  obtenidas con los tres equipos muestreadores: Hivol, Microvol y Partisol; considerando los datos validados

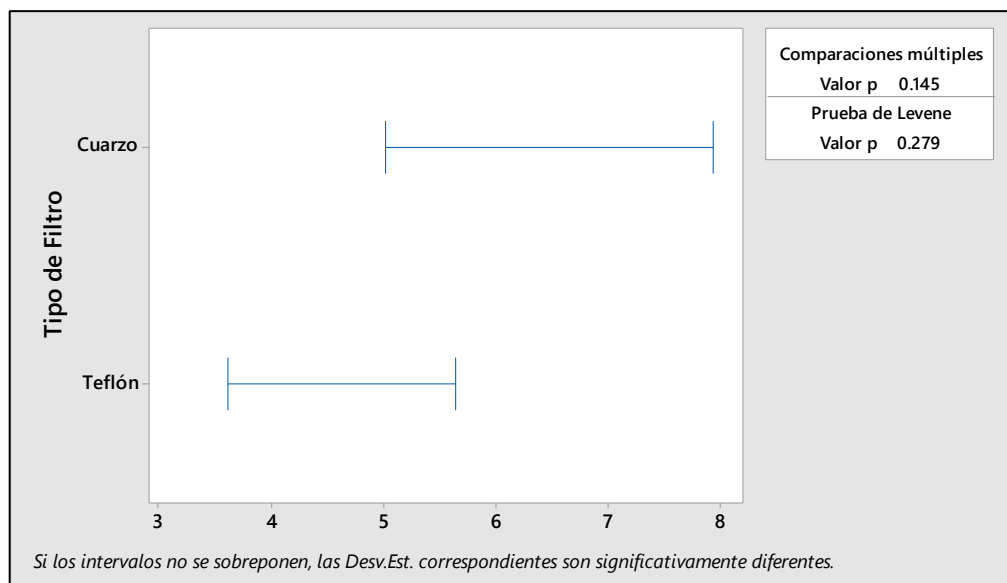
**Anexo 4:** Cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para la sección “Evaluación del nivel de igualdad o diferencia entre los grupos de concentración para el muestreador Partisol 2000H”.



**Figura 1:** Gráfico de la prueba estadística de normalidad de Anderson Darling para las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> usando filtros de fibra de cuarzo



**Figura 2:** Gráfico de la prueba estadística de normalidad de Anderson Darling para las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> usando filtros de teflón



**Figura 3:** Gráfico de la prueba estadística homogeneidad de varianzas entre las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> usando cuarzo y teflón

**Método**

Hipótesis nula            Todas las varianzas son iguales  
Hipótesis alterna        Por lo menos una varianza es diferente  
Nivel de significancia     $\alpha = 0.05$

**Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar**

Tipo de Filtro	N	Desv.Est.	IC
Cuarzo	21	6.00943	(4.28143; 9.44270)
Teflón	22	4.30220	(3.23293; 6.37459)

*Nivel de confianza individual = 97.5%*

**Pruebas**

Método	Estadística de prueba	Valor p
Comparaciones múltiples	—	0.145
Levene	1.20	0.279

**Figura 4:** Desarrollo de la prueba estadística homogeneidad de varianzas entre las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> usando cuarzo y teflón



### Método

$\mu_1$ : media de PM2.5 cuando Tipo de Filtro = Cuarzo

$\mu_2$ : media de PM2.5 cuando Tipo de Filtro = Teflón

Diferencia:  $\mu_1 - \mu_2$

*No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.*

### Estadísticos descriptivos: PM2.5

Tipo de Filtro	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
Cuarzo	21	30.03	6.01	1.3
Teflón	22	27.18	4.30	0.92

### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
2.86	(-0.39; 6.10)

### Prueba

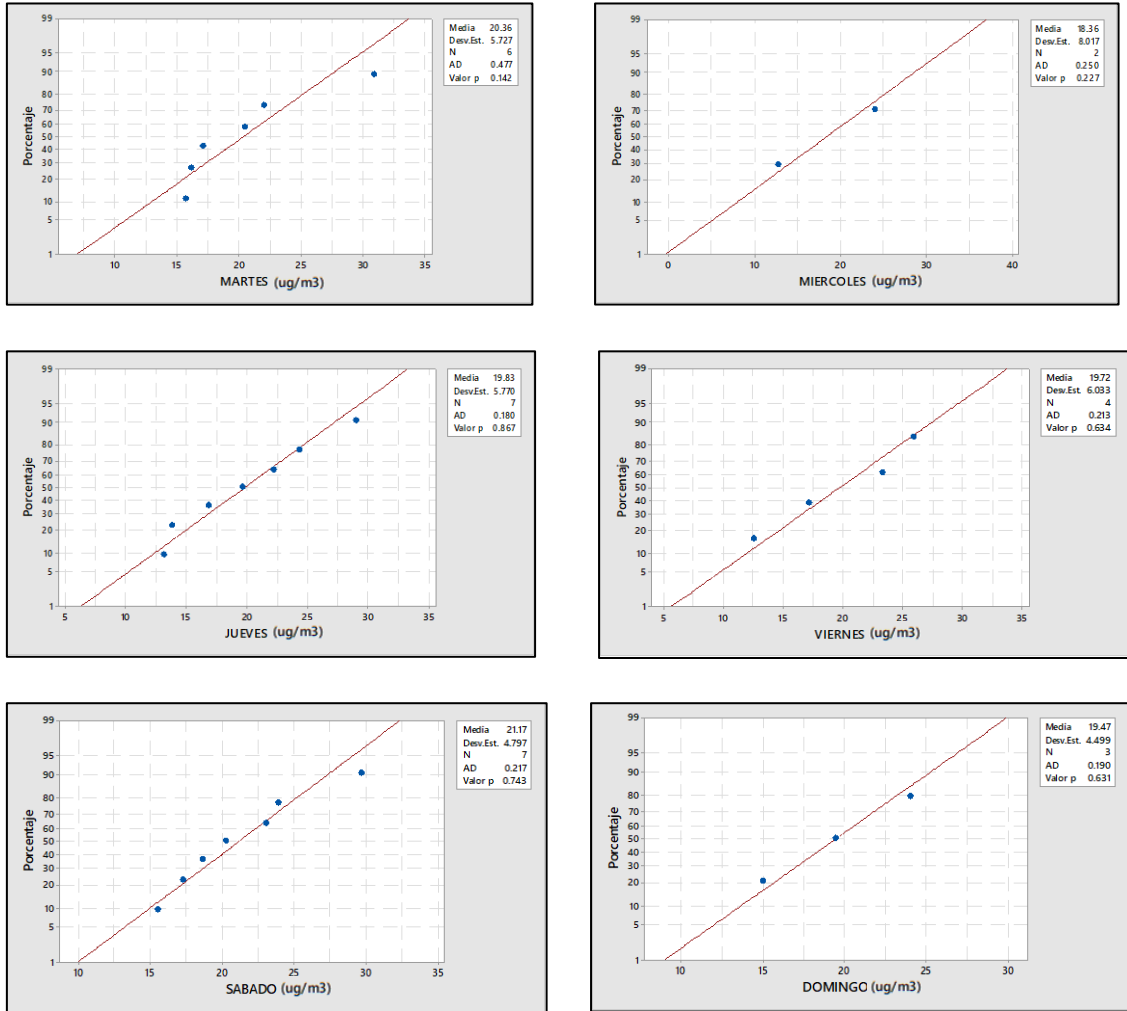
Hipótesis nula  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

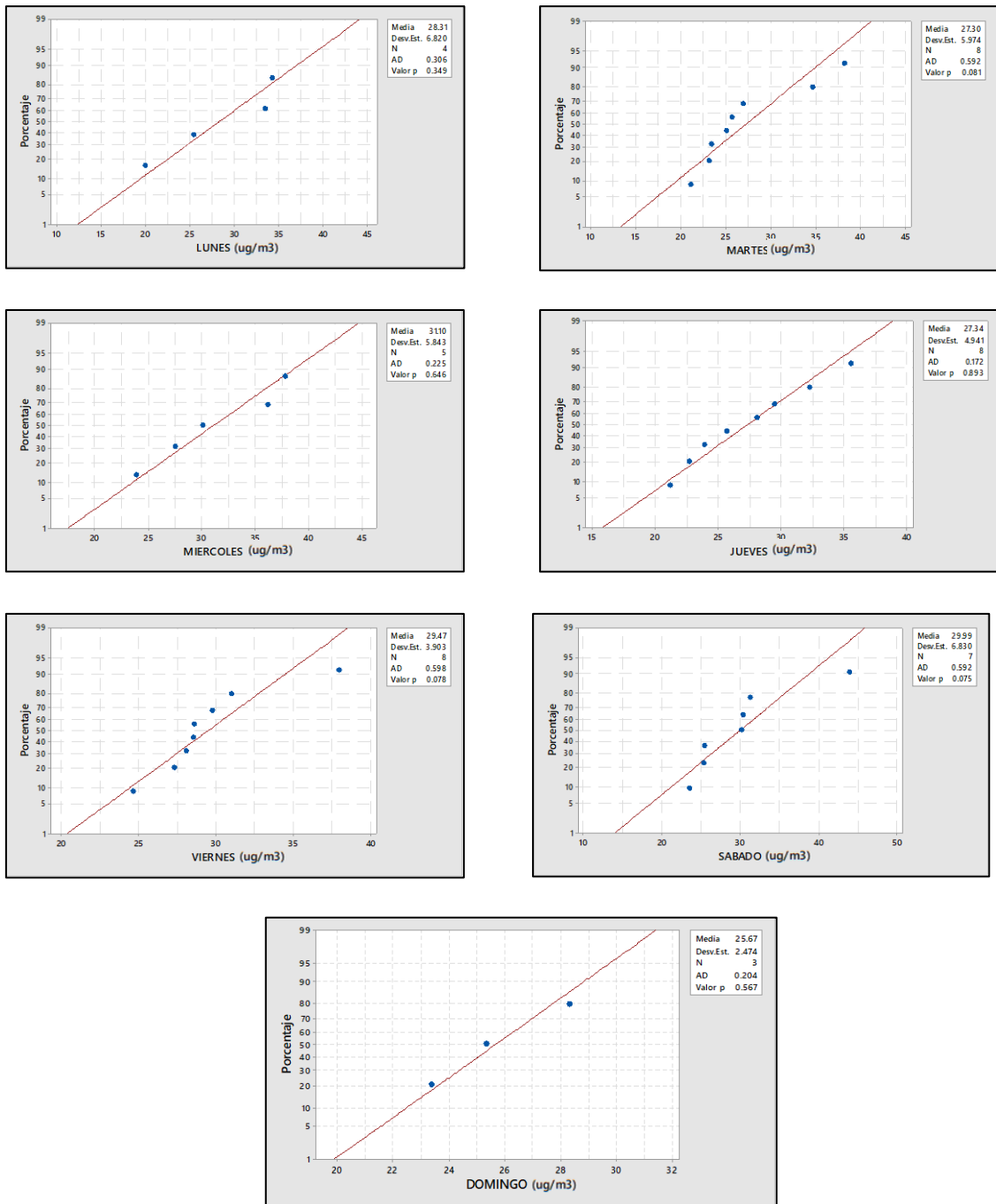
Valor T	GL	Valor p
1.79	36	0.083

**Figura 5:** Desarrollo de la prueba estadística t en dos muestras entre las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> usando cuarzo y teflón

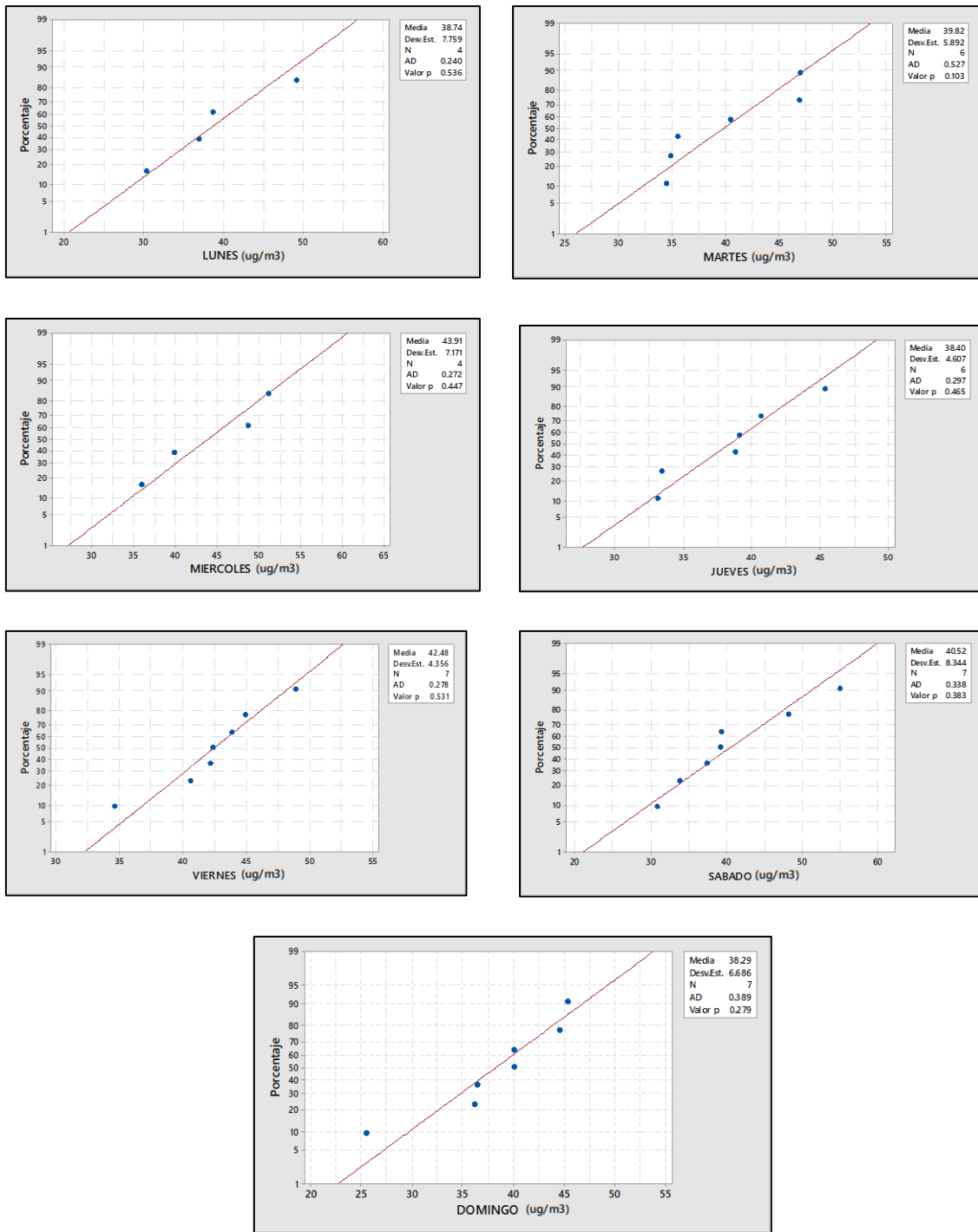
**Anexo 5:** Cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para la sección “Comportamiento de la concentración de PM<sub>2.5</sub> en relación a los días de la semana”.



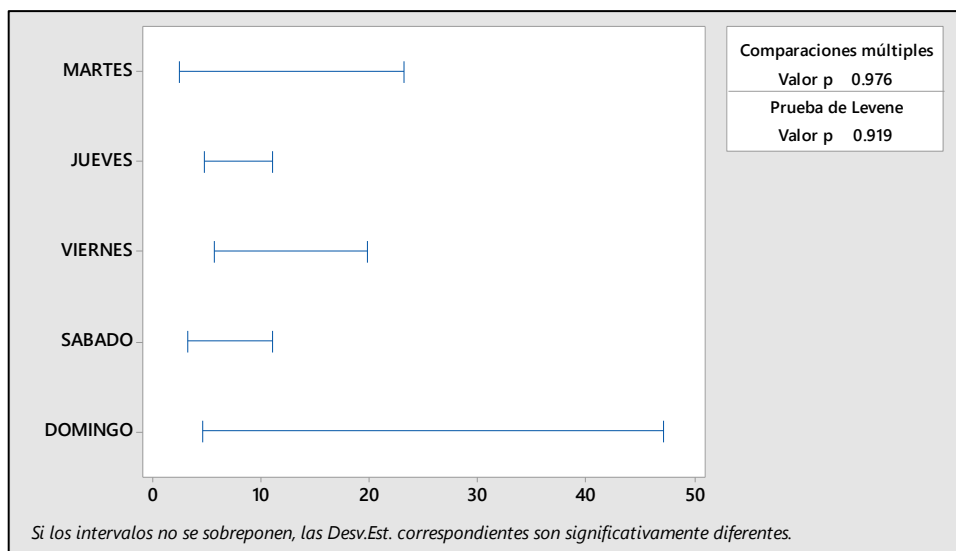
**Figura 1:** Gráfico de la prueba estadística de normalidad de Anderson Darling para las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> para el muestreador Microvol - 1100



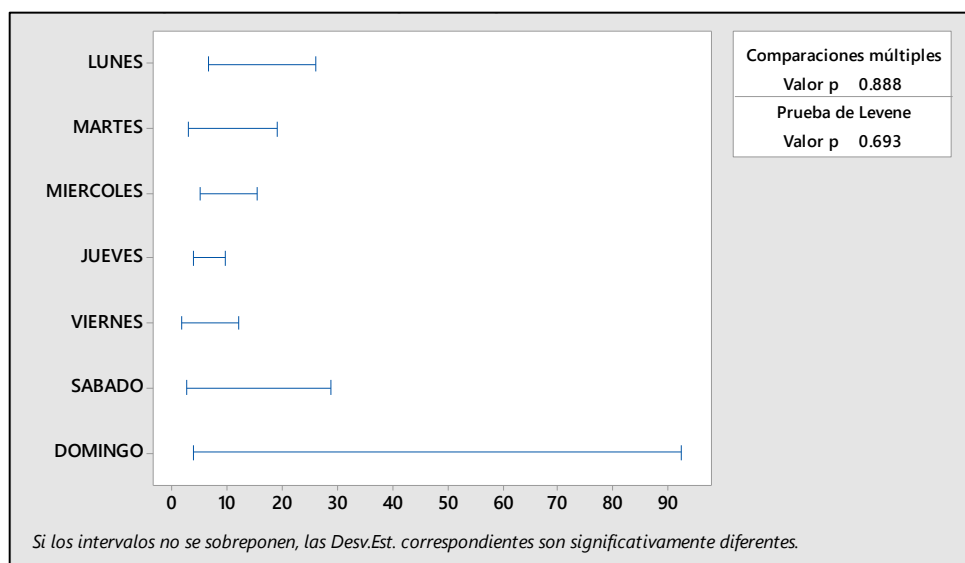
**Figura 2:** Gráfico de la prueba estadística de normalidad de Anderson Darling para las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> para el muestreador Partisol 2000H



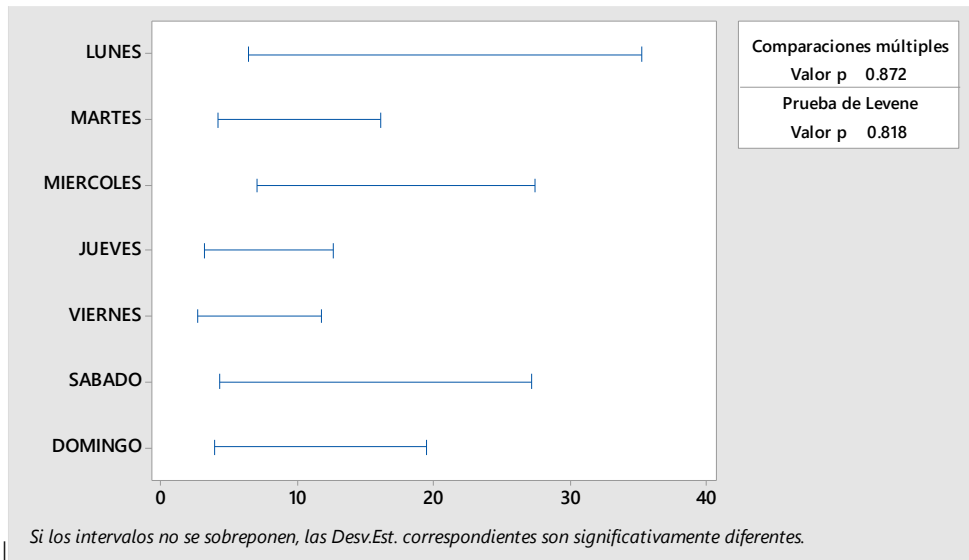
**Figura 3:** Gráfico de la prueba estadística de normalidad de Anderson Darling para las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> para el muestreador Hivol - 3000



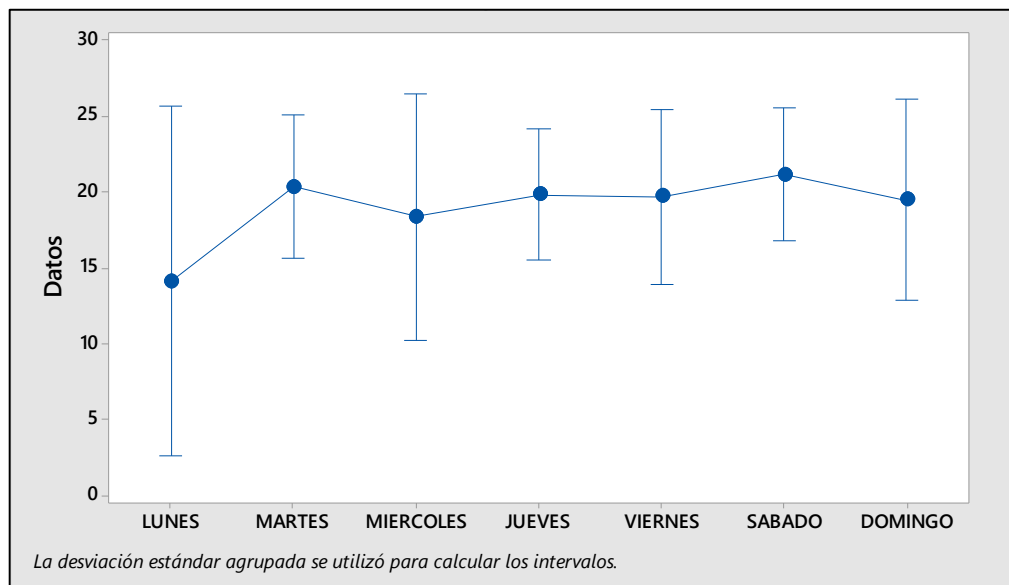
**Figura 4:** Resultado de prueba estadística homogeneidad de varianzas aplicado a los datos de concentración de  $PM_{2,5}$  obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo; para el muestreador Microvol - 1100



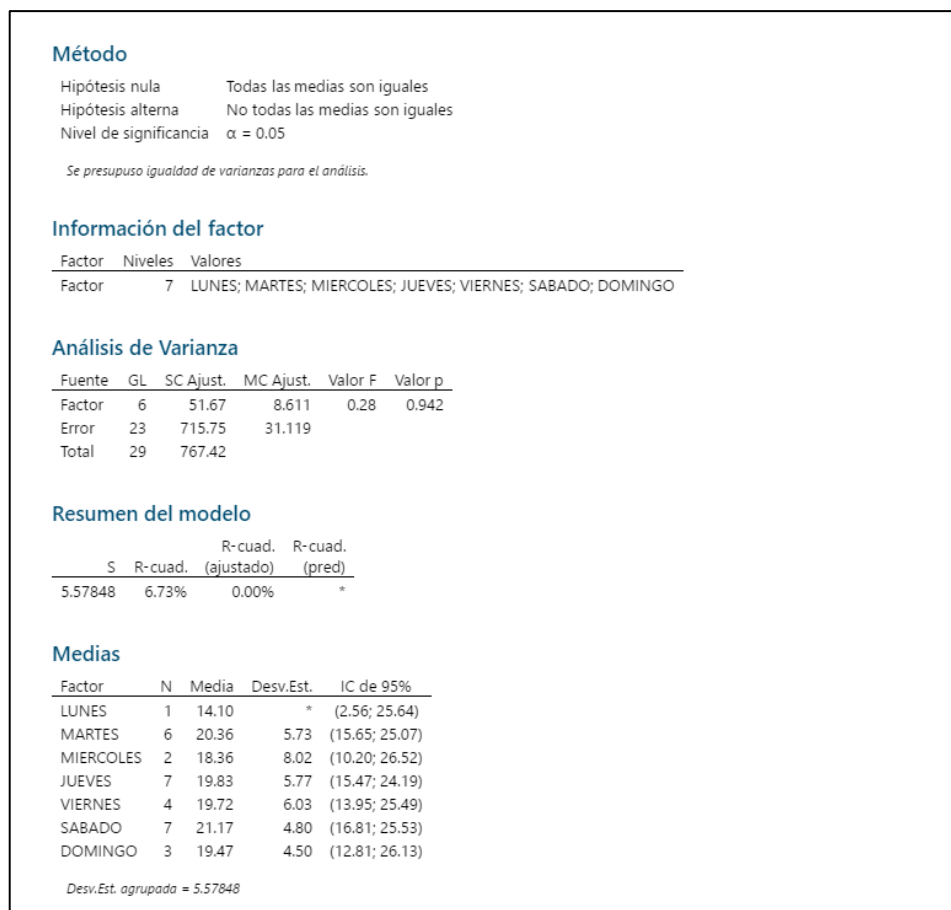
**Figura 5:** Resultado de prueba estadística homogeneidad de varianzas aplicado a los datos de concentración de  $PM_{2,5}$  obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo; para el muestreador Partisol 2000H



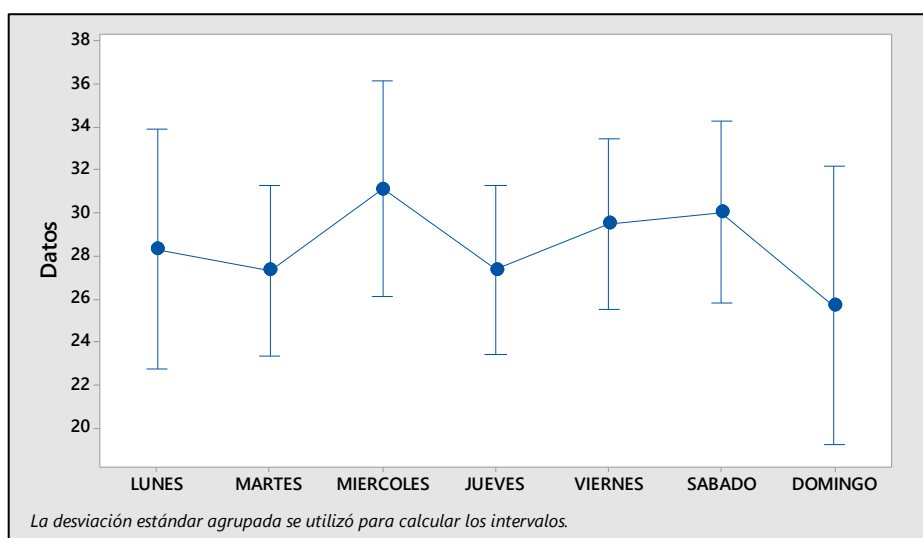
**Figura 6:** Resultado de prueba estadística homogeneidad de varianzas aplicado a los datos de concentración de  $PM_{2,5}$  obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo; para el muestreador Hivol - 3000



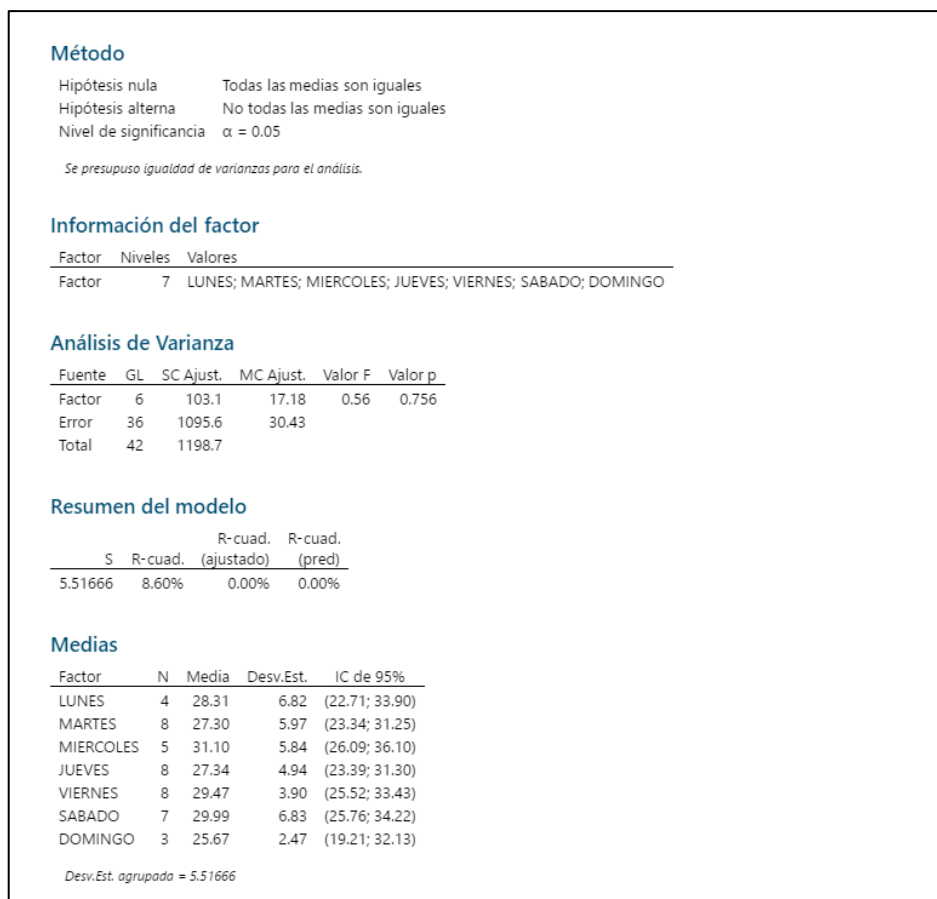
**Figura 7:** Gráfica de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de  $PM_{2,5}$  obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo; para el muestreador Microvol - 1100



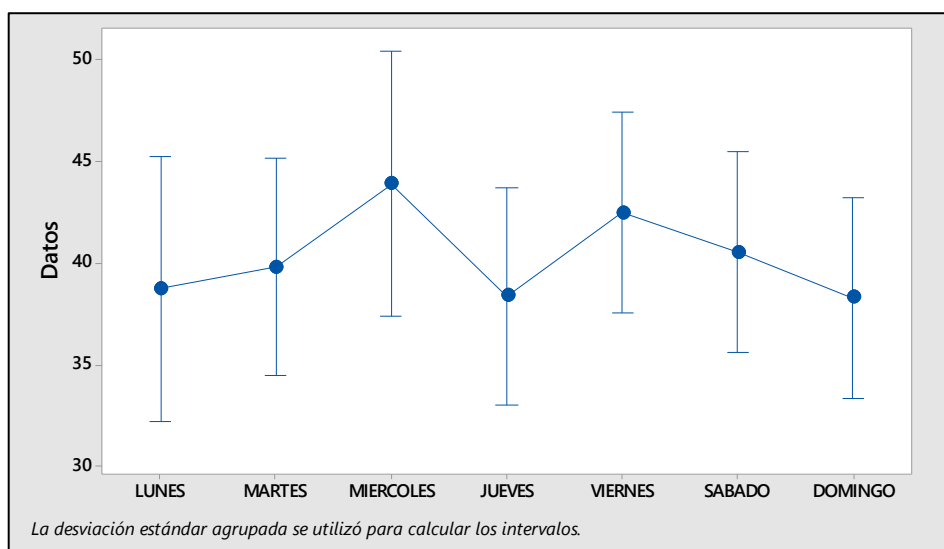
**Figura 8:** Desarrollo de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de  $PM_{2,5}$  obtenidos en los días lunes a domingo, durante el periodo de monitoreo; para el muestreador Microvol - 1100



**Figura 9:** Gráfica de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de  $PM_{2,5}$  obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo; para el muestreador Partisol 2000H



**Figura 10:** Desarrollo de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de  $PM_{2.5}$  obtenidos en los días lunes a domingo, durante el periodo de monitoreo; para el muestreador Partisol 2000H



**Figura 11:** Gráfica de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de  $PM_{2.5}$  obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo; para el muestreador Hivol - 3000



## Método

Hipótesis nula      Todas las medias son iguales  
Hipótesis alterna    No todas las medias son iguales  
Nivel de significancia    $\alpha = 0.05$

*Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.*

## Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	7	LUNES; MARTES; MIERCOLES; JUEVES; VIERNES; SABADO; DOMINGO

## Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	6	146.5	24.42	0.59	0.738
Error	34	1414.4	41.60		
Total	40	1560.9			

## Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
6.44979	9.39%	0.00%	0.00%

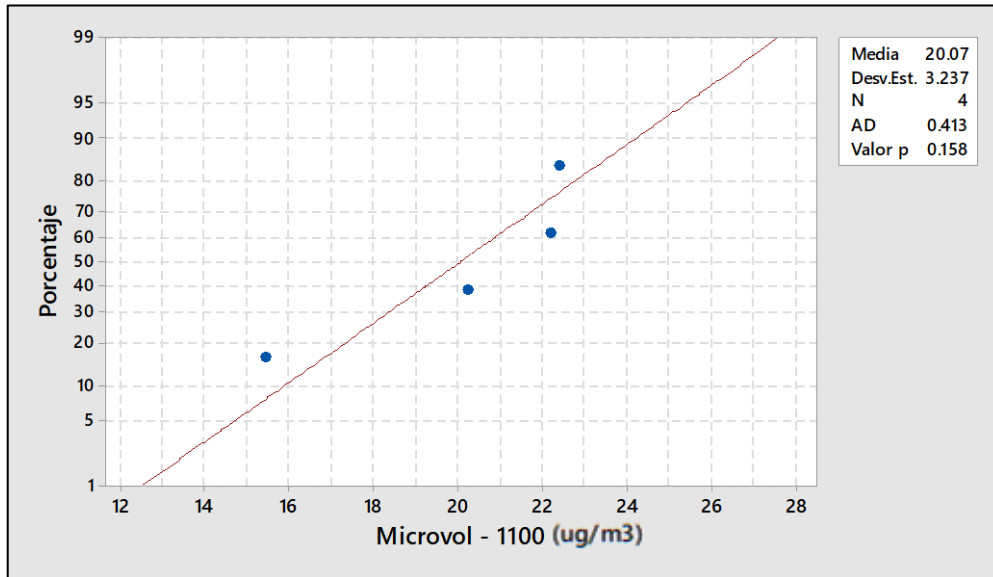
## Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
LUNES	4	38.74	7.76	(32.19; 45.30)
MARTES	6	39.82	5.89	(34.47; 45.17)
MIERCOLES	4	43.91	7.17	(37.36; 50.46)
JUEVES	6	38.40	4.61	(33.04; 43.75)
VIERNES	7	42.48	4.36	(37.53; 47.44)
SABADO	7	40.52	8.34	(35.56; 45.47)
DOMINGO	7	38.29	6.69	(33.34; 43.25)

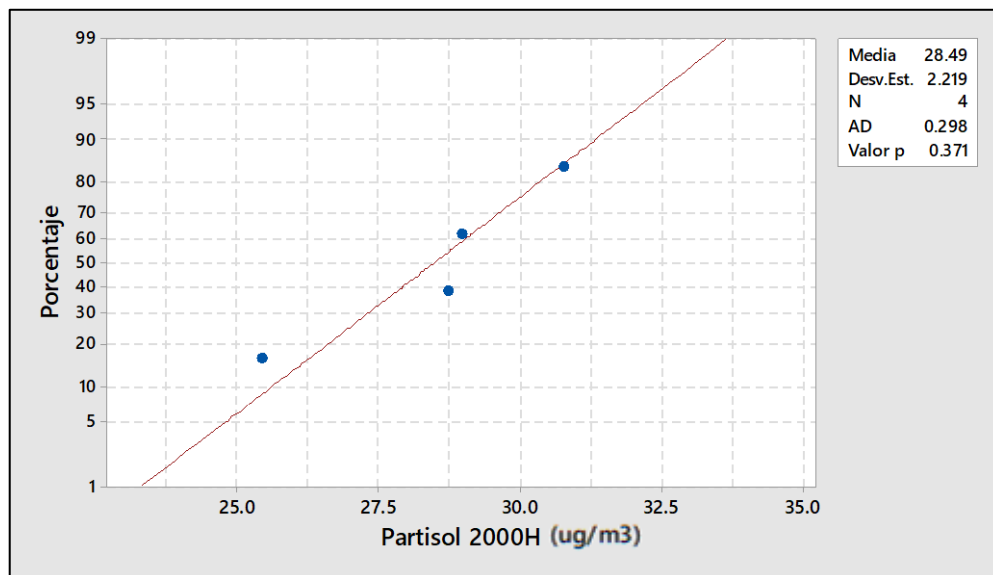
*Desv.Est. agrupada = 6.44979*

**Figura 12:** Desarrollo de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de PM<sub>2,5</sub> obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo; para el muestreador Hivol - 3000

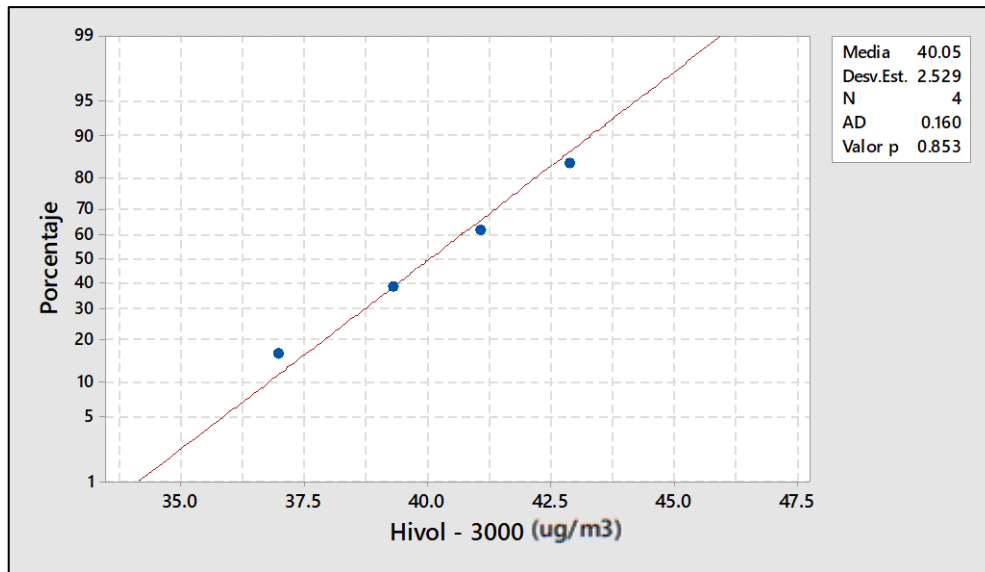
**Anexo 6:** Cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para la sección “Comportamiento de la concentración de PM<sub>2,5</sub> en relación a los meses de muestreo”.



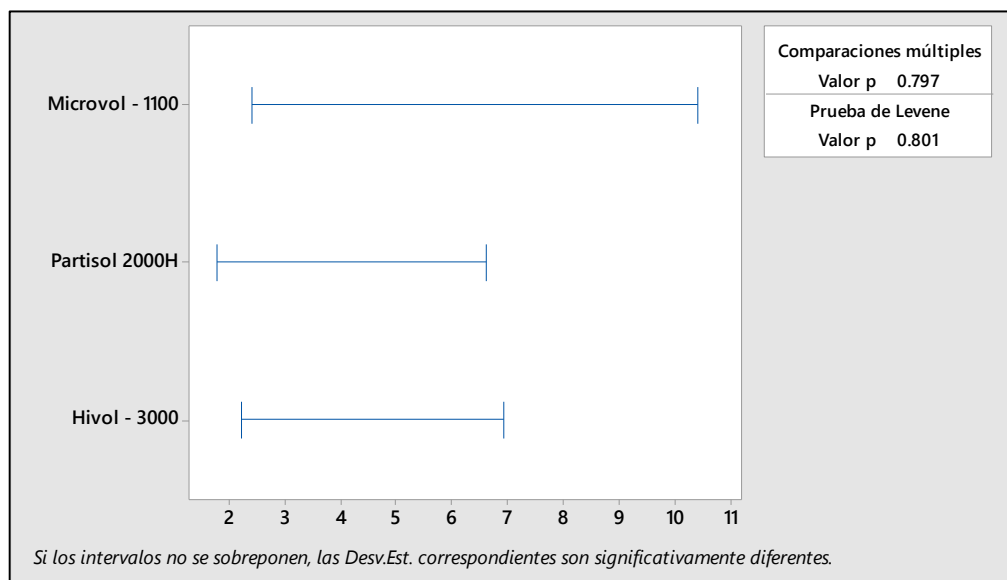
**Figura 1:** Gráfico de la prueba estadística de normalidad de Anderson Darling para las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> para el muestreador Microvol - 1100



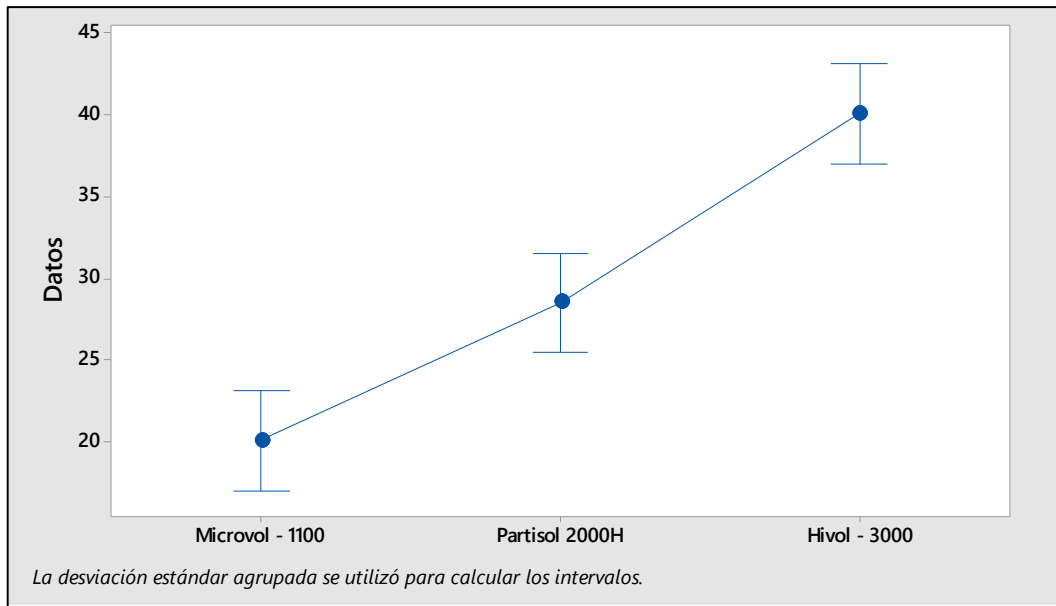
**Figura 2:** Gráfico de la prueba estadística de normalidad de Anderson Darling para las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> para el muestreador Partisol 2000H



**Figura 3:** Gráfico de la prueba estadística de normalidad de Anderson Darling para las concentraciones de  $PM_{2,5}$  para el muestreador Hivol - 3000



**Figura 4:** Resultado de prueba estadística homogeneidad de varianzas aplicado a los datos de concentración de  $PM_{2,5}$  obtenidos en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo; para los muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol - 3000.



**Figura 5:** Gráfica de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de  $PM_{2,5}$  obtenidos en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo; para los muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol - 3000.

**Método**

Hipótesis nula      Todas las medias son iguales  
 Hipótesis alterna      No todas las medias son iguales  
 Nivel de significancia       $\alpha = 0.05$

*Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.*

**Información del factor**

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	Microvol - 1100; Partisol 2000H; Hivol - 3000

**Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	805.26	402.628	55.41	0.000
Error	9	65.39	7.266		
Total	11	870.65			

**Resumen del modelo**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
2.69556	92.49%	90.82%	86.65%

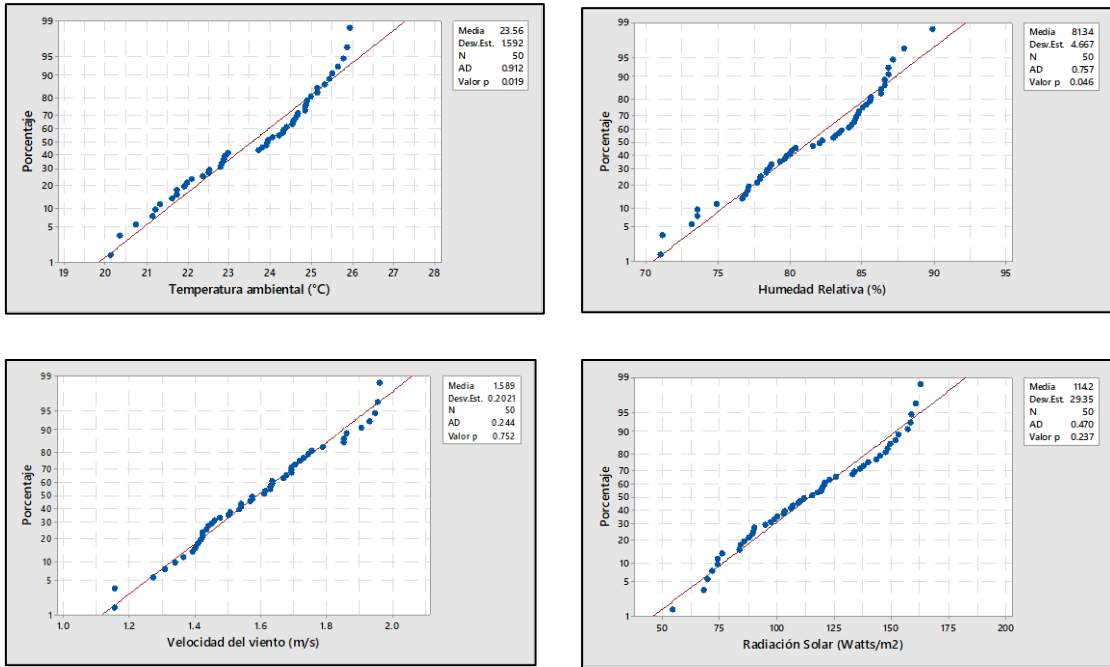
**Medias**

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Microvol - 1100	4	20.07	3.24	(17.02; 23.11)
Partisol 2000H	4	28.49	2.22	(25.44; 31.54)
Hivol - 3000	4	40.05	2.53	(37.00; 43.10)

*Desv.Est. agrupada = 2.69556*

**Figura 6:** Desarrollo de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de  $PM_{2,5}$  obtenidos en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo; para los muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol - 3000.

**Anexo 7:** Cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para la sección “Relación entre las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> y las variables meteorológicas: temperatura ambiental, humedad relativa, velocidad del viento, precipitación y radiación solar”.



**Figura 1:** Gráfico de la prueba estadística de normalidad de Anderson Darling para las variables meteorológicas: temperatura ambiental, humedad relativa, velocidad de viento y radiación solar.

a) Microvol – 1100

Rho de Spearman: MICROVOL; Temperatura ambiental (°C)	
<b>Correlaciones</b>	
Rho de Spearman	-0.606
Valor p	0.000

b) Partisol 2000H

Rho de Spearman: PARTISOL; Temperatura ambiental (°C)	
<b>Correlaciones</b>	
Rho de Spearman	-0.268
Valor p	0.082

c) Hivol – 3000

Rho de Spearman: HIVOL; Temperatura ambiental (°C)	
<b>Correlaciones</b>	
Rho de Spearman	-0.126
Valor p	0.432

**Figura 2:** Desarrollo de la prueba estadística correlación de Spearman entre la concentración de PM<sub>2,5</sub> de los muestreadores: a) Microvol – 1100, b) Partisol 2000H y c) Hivol - 3000, y la temperatura ambiental (°C).

a) Microvol - 1100

Rho de Spearman: MICROVOL; Humedad Relativa (%)	
<b>Correlaciones</b>	
Rho de Spearman	0.453
Valor p	0.012

b) Partisol 2000H

Rho de Spearman: PARTISOL; Humedad Relativa (%)	
<b>Correlaciones</b>	
Rho de Spearman	0.209
Valor p	0.178

c) Hivol – 3000

Rho de Spearman: HIVOL; Humedad Relativa (%)	
<b>Correlaciones</b>	
Rho de Spearman	-0.149
Valor p	0.351

**Figura 3:** Desarrollo de la prueba estadística correlación de Spearman entre la concentración de PM<sub>2,5</sub> de los muestreadores: a) Hivol – 3000, b) Microvol – 1100 y c) Partisol 2000H, y la humedad relativa (%).

a) Microvol - 1100

Correlación: MICROVOL; Velocidad del viento (m/s)	
<b>Correlaciones</b>	
Correlación de Pearson	0.038
Valor p	0.842

b) Partisol 2000H

Correlación: PARTISOL; Velocidad del viento (m/s)	
<b>Correlaciones</b>	
Correlación de Pearson	-0.020
Valor p	0.899

c) Hivol – 3000

Correlación: HIVOL; Velocidad del viento (m/s)	
<b>Correlaciones</b>	
Correlación de Pearson	-0.130
Valor p	0.418

**Figura 4:** Desarrollo de la prueba estadística correlación de Pearson entre la concentración de PM<sub>2,5</sub> de los muestreadores: a) Hivol – 3000, b) Microvol – 1100 y c) Partisol 2000H, y la velocidad del viento (m/s).

a) Microvol - 1100

Correlación: MICROVOL; Radiación Solar (Watts/m2)	
<b>Correlaciones</b>	
Correlación de Pearson	-0.332
Valor p	0.073

b) Partisol 2000H

Correlación: PARTISOL; Radiación Solar (Watts/m2)	
<b>Correlaciones</b>	
Correlación de Pearson	-0.086
Valor p	0.582

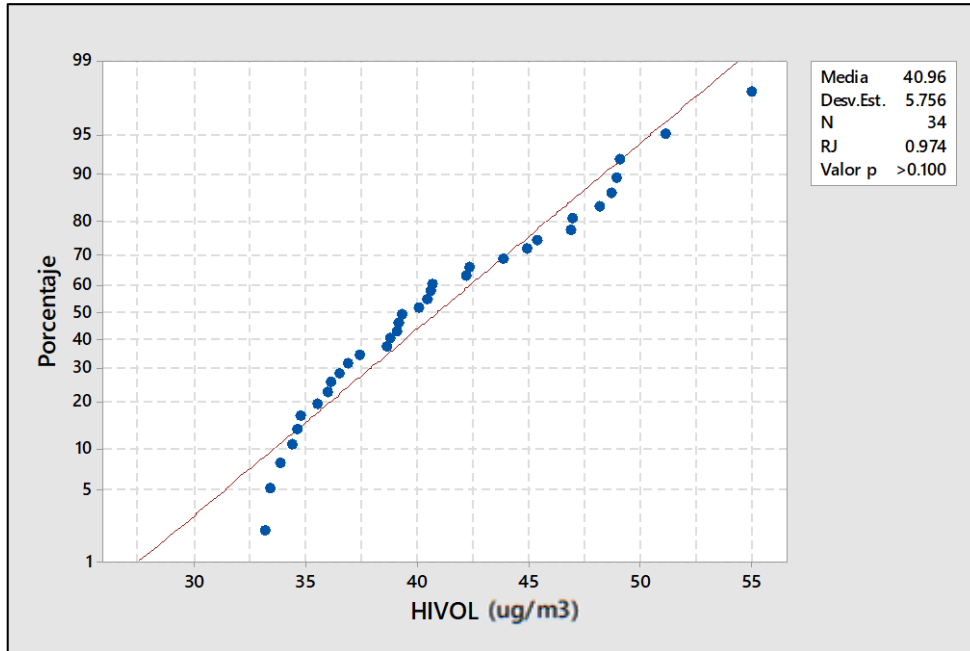
c) Hivol – 3000

Correlación: HIVOL; Radiación Solar (Watts/m2)	
<b>Correlaciones</b>	
Correlación de Pearson	0.125
Valor p	0.435

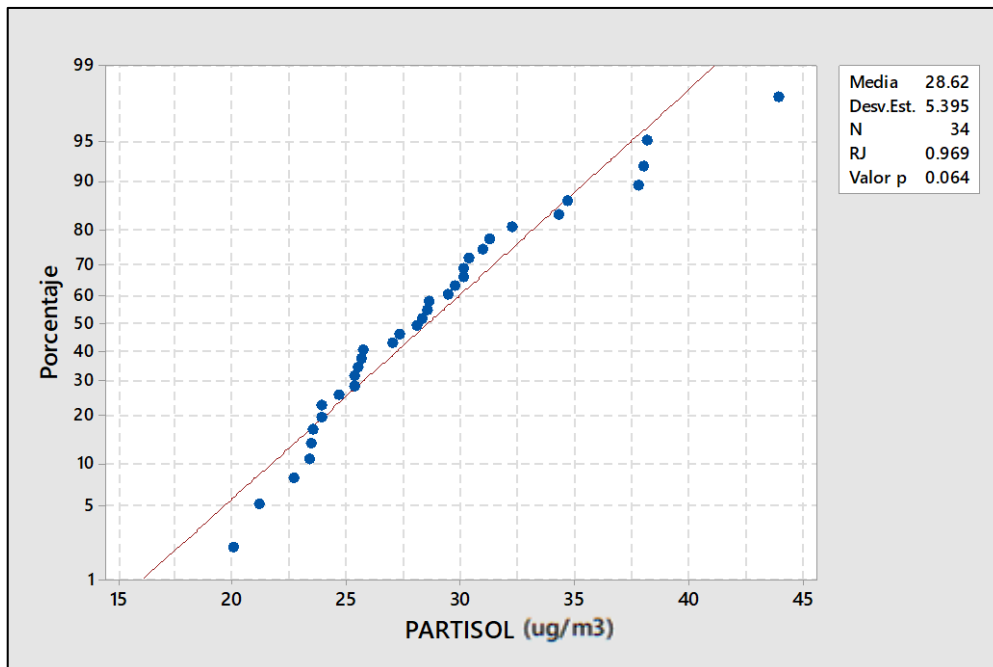
**Figura 5:** Desarrollo de la prueba estadística correlación de Pearson entre la concentración de PM<sub>2,5</sub> de los muestreadores: a) Hivol – 3000, b) Microvol – 1100 y c) Partisol 2000H, y la radiación solar (Watts/m<sup>2</sup>).



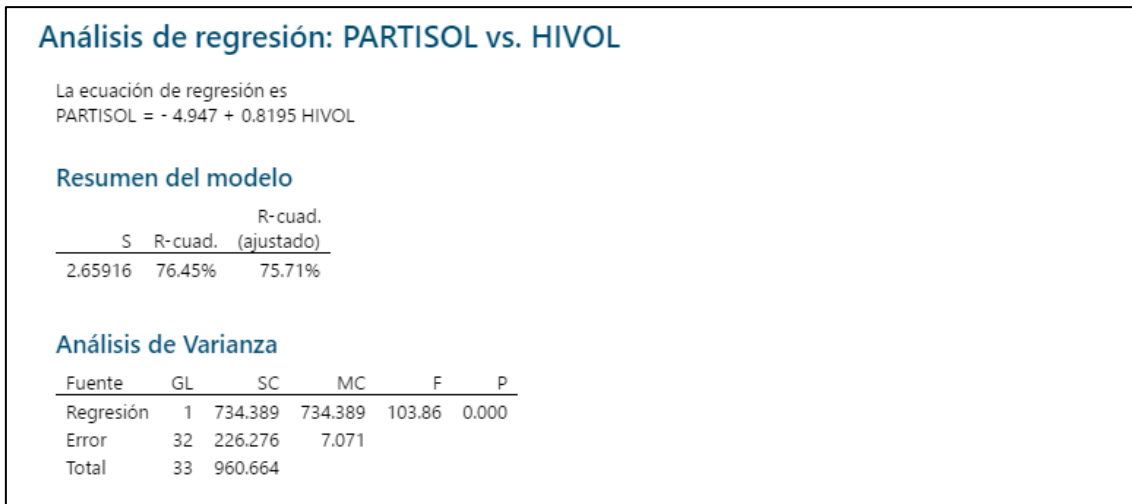
**Anexo 8:** Cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para la sección “Relación entre la metodología gravimétrica de alto volumen (Hivol – 3000) y la metodología gravimétrica de bajo volumen (Partisol 2000H) y determinación de ecuaciones de corrección”.



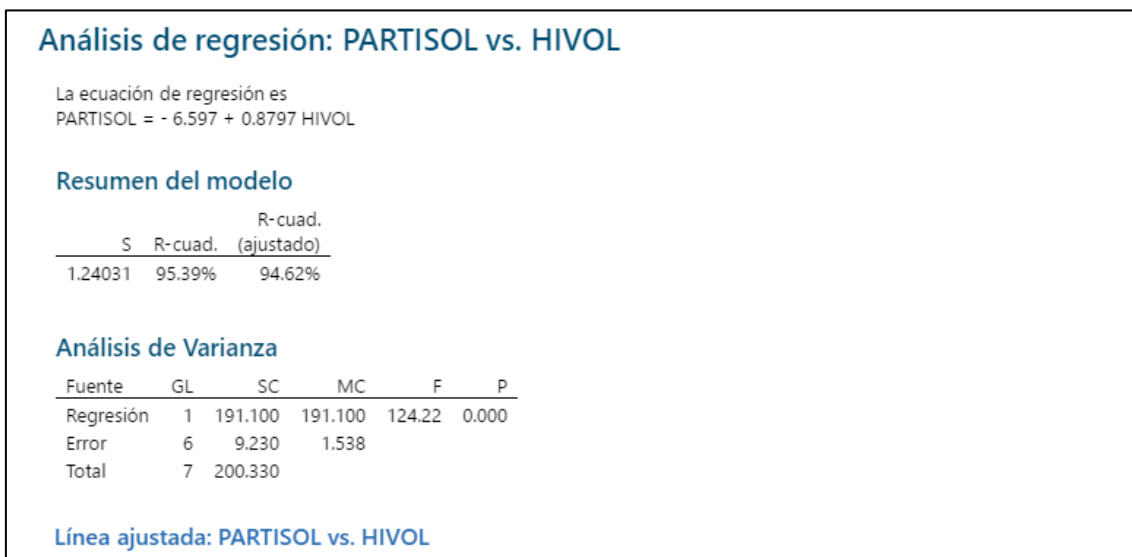
**Figura 1:** Gráfico de la prueba estadística de normalidad de Ryan Joiner para las concentraciones de  $PM_{2,5}$  para el muestreador Hivol – 3000



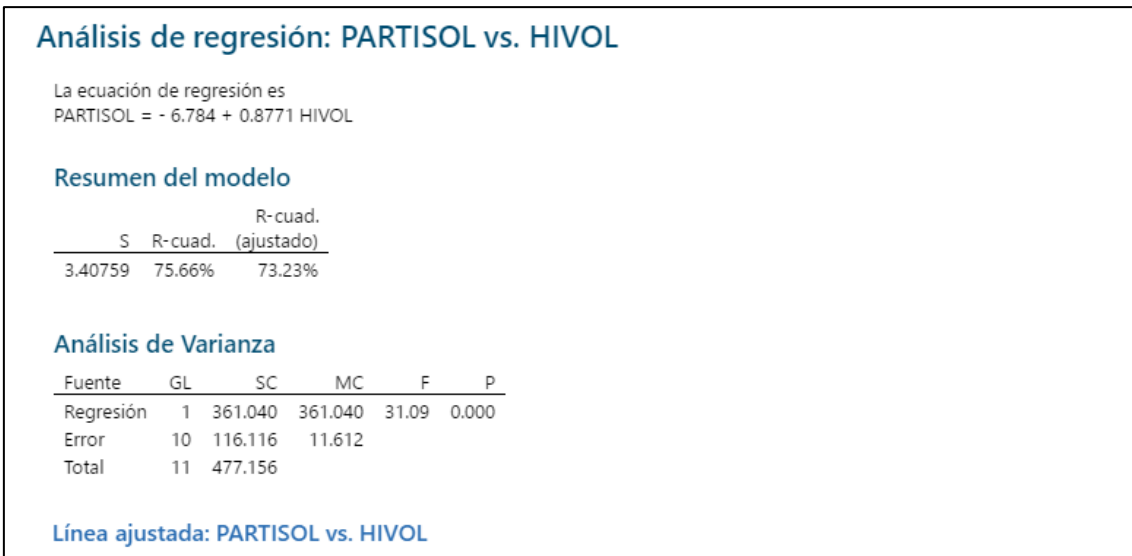
**Figura 2:** Gráfico de la prueba estadística de normalidad de Ryan Joiner para las concentraciones de  $PM_{2,5}$  para el muestreador Partisol 2000H



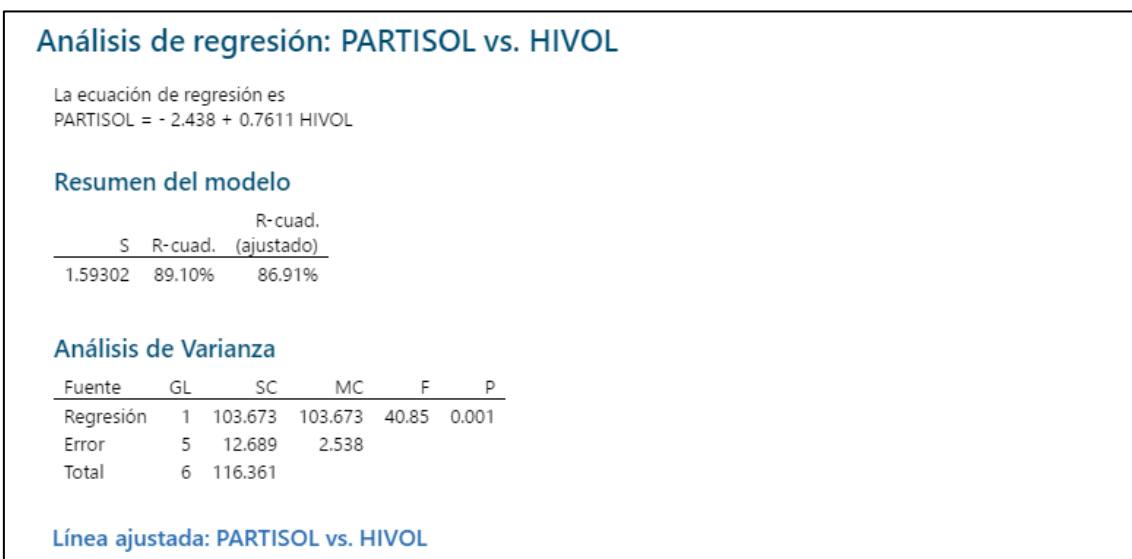
**Figura 3:** Desarrollo del análisis de regresión para los equipos Hivol – 3000 y Partisol 2000H, durante el periodo de muestreo total



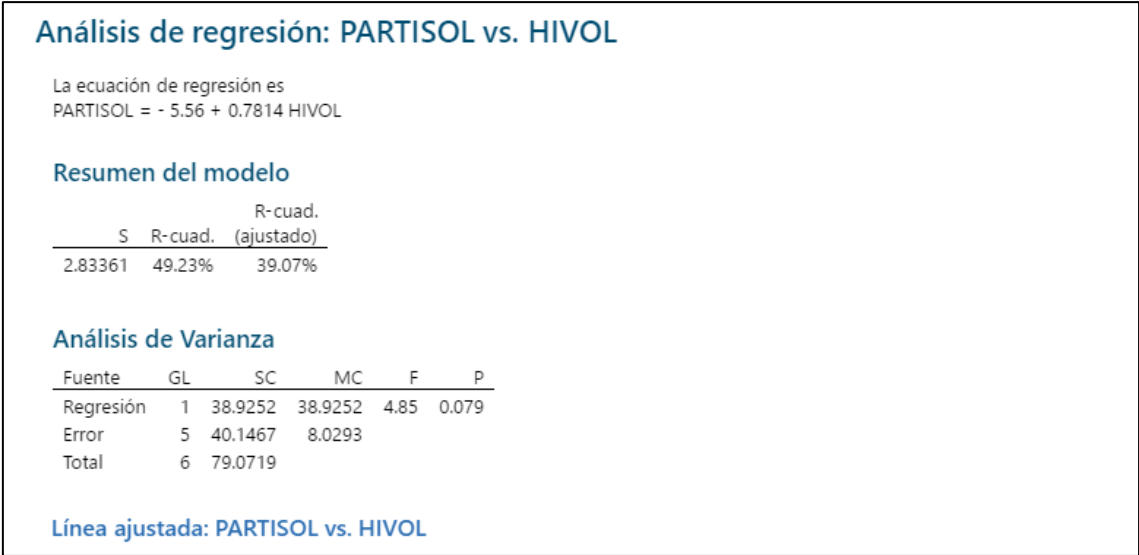
**Figura 4:** Desarrollo del análisis de regresión para los equipos Hivol – 3000 y Partisol 2000H, durante el periodo de muestreo diciembre 2018



**Figura 5:** Desarrollo del análisis de regresión para los equipos Hivol – 3000 y Partisol 2000H, durante el periodo de muestreo enero 2019

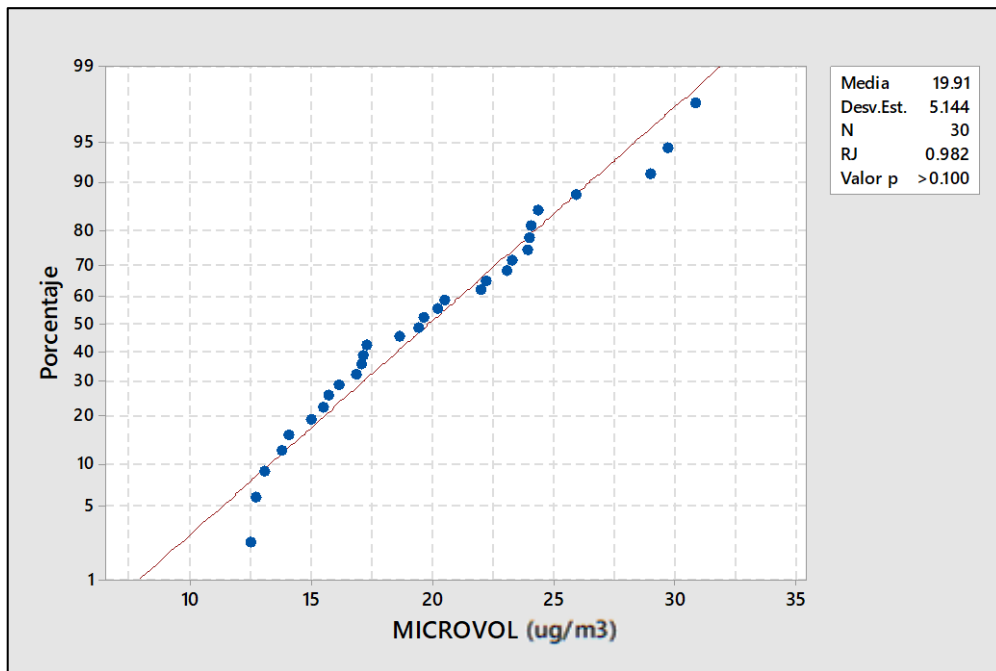


**Figura 6:** Desarrollo del análisis de regresión para los equipos Hivol – 3000 y Partisol 2000H, durante el periodo de muestreo febrero 2019

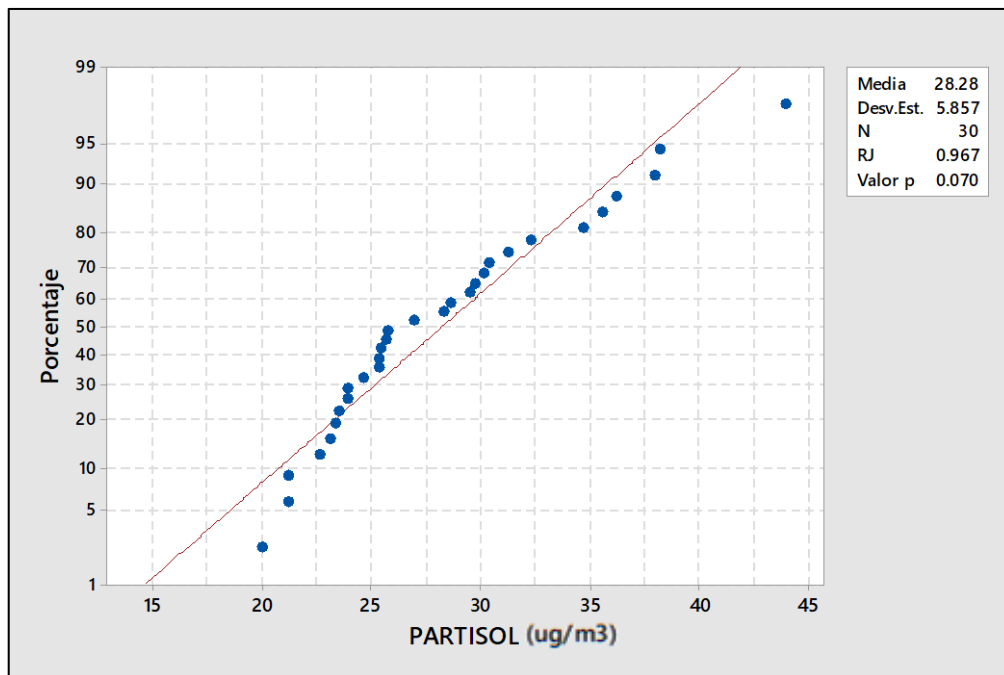


**Figura 7:** Desarrollo del análisis de regresión para los equipos Hivol – 3000 y Partisol 2000H, durante el periodo de muestreo marzo 2019

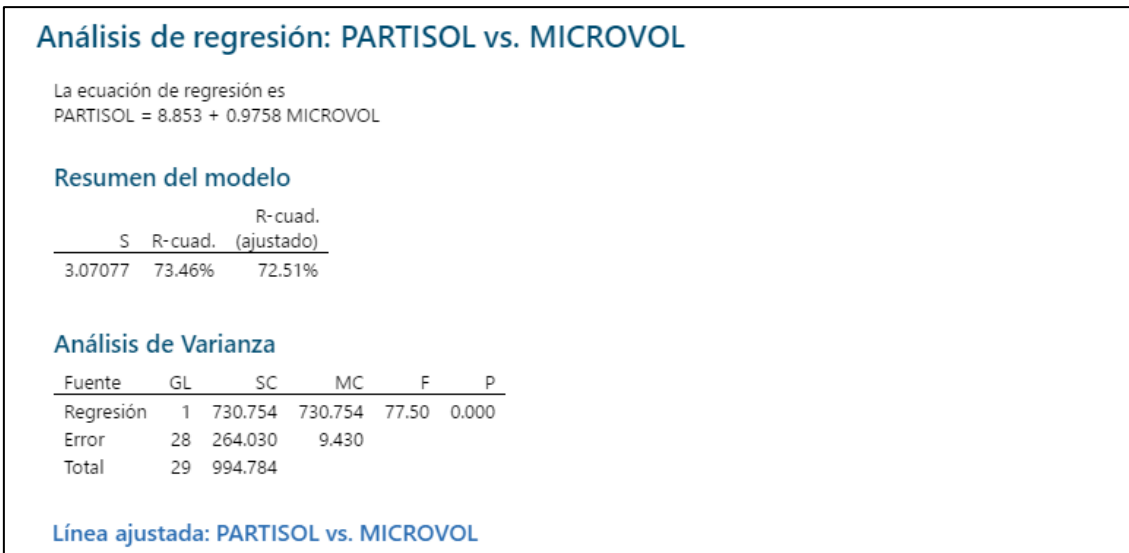
**Anexo 9:** Cálculos estadísticos realizados en Minitab 18 para la sección “Relación entre la metodología gravimétrica de bajo volumen (Microvol – 1100) y la metodología gravimétrica de bajo volumen (Partisol 2000H) y determinación de ecuaciones de corrección”



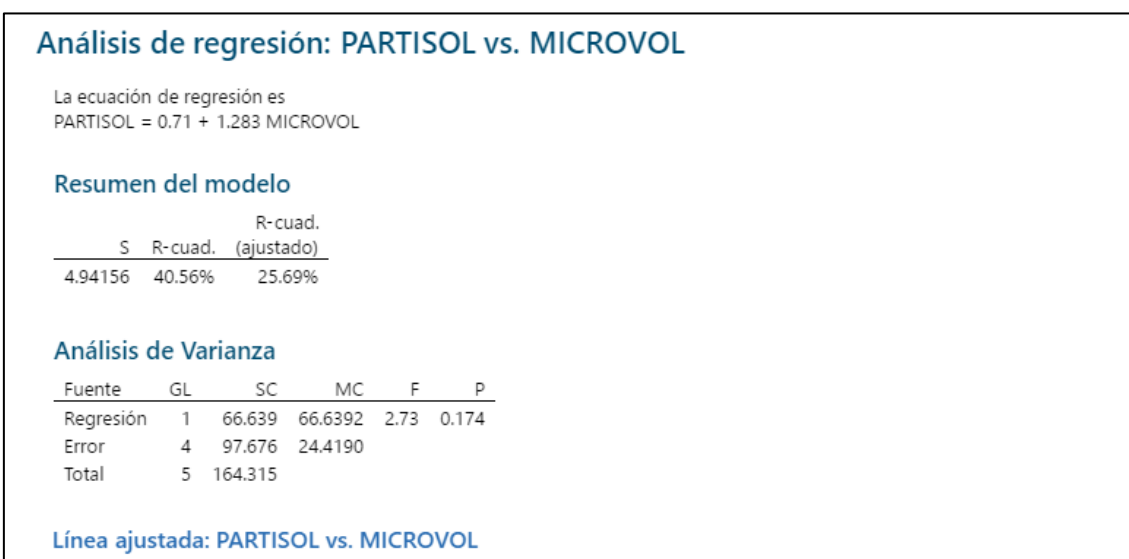
**Figura 1:** Gráfico de la prueba estadística de normalidad de Ryan Joiner para las concentraciones de  $PM_{2.5}$  para el muestreador Microvol - 1100



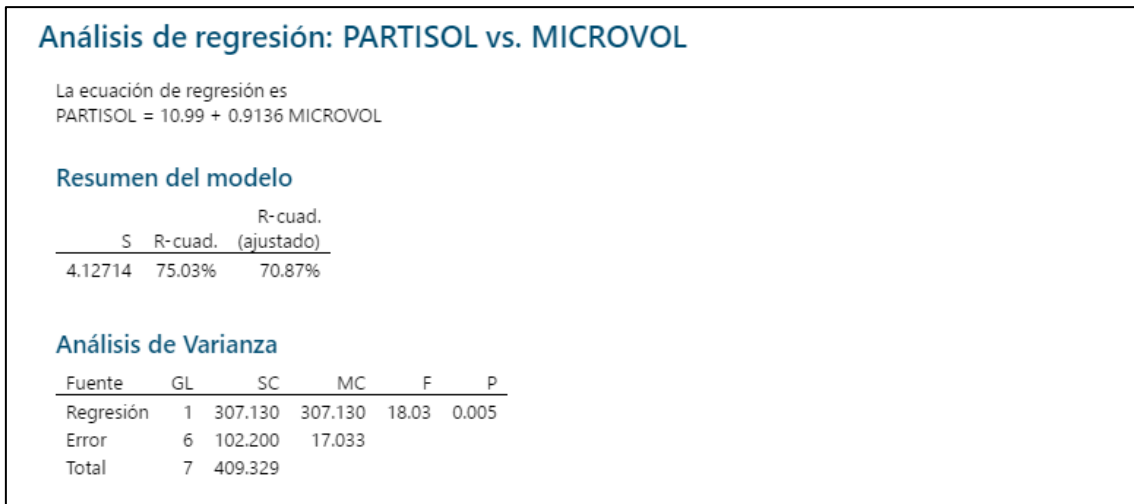
**Figura 2:** Gráfico de la prueba estadística de normalidad de Ryan Joiner para las concentraciones de  $PM_{2.5}$  para el muestreador Partisol 2000H



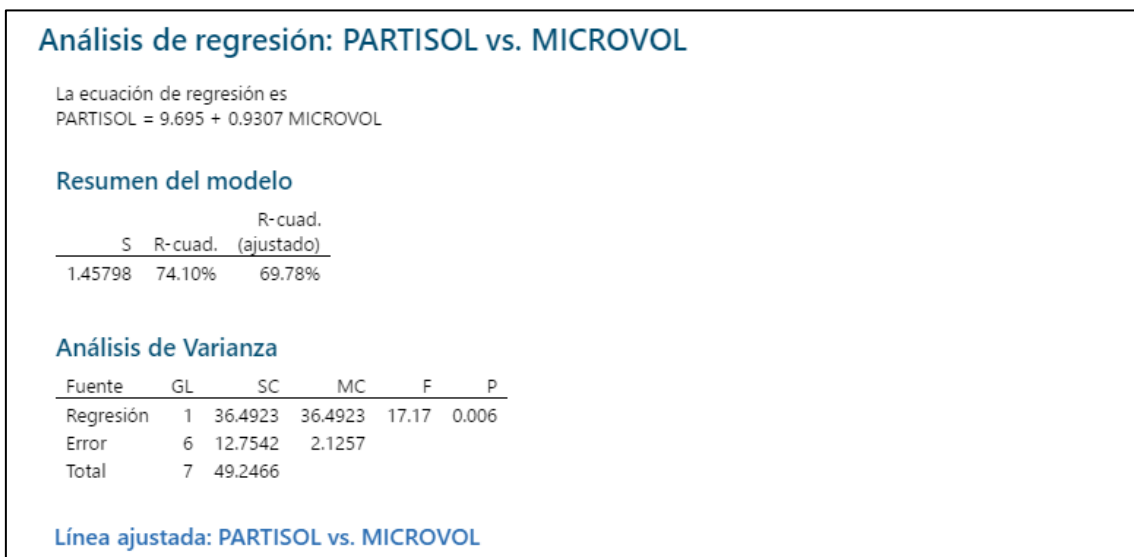
**Figura 3:** Desarrollo del análisis de regresión para los equipos Microvol - 1100 y Partisol 2000H, durante el periodo de muestreo total



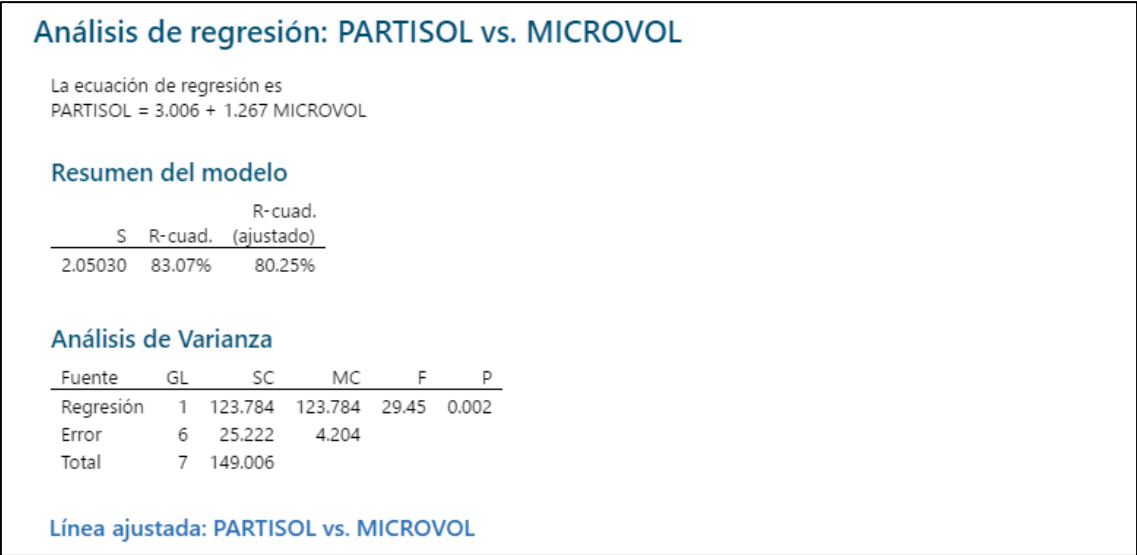
**Figura 4:** Desarrollo del análisis de regresión para los equipos Microvol - 1100 y Partisol 2000H, durante el periodo de muestreo diciembre 2018



**Figura 5:** Desarrollo del análisis de regresión para los equipos Microvol - 1100 y Partisol 2000H, durante el periodo de muestreo enero 2019



**Figura 6:** Desarrollo del análisis de regresión para los equipos Microvol - 1100 y Partisol 2000H, durante el periodo de muestreo febrero 2019



**Figura 7:** Desarrollo del análisis de regresión para los equipos Microvol - 1100 y Partisol 2000H, durante el periodo de muestreo marzo 2019



## Anexo 10: Cotizaciones económicas

* CANT		UNI	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	V.UNI	IMPORTE
1	1.00	Uni	ECO-MIC1100	<p>Muestreador de Partículas MicroVol1100, Marca Ecotech, Modelo MicroVol1100</p> <p>Especificaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Muestreador volumétrico de partículas en el aire, de bajo volumen, que permite colectar partículas en el filtro para determinación de PTS, PM10 y PM2.5 (secuencial).</li> <li>-Control Activo de Flujo Volumétrico, el cual mantiene un flujo promedio constante aún con incremento de partículas.</li> <li>-Conversión automática de volumen total acumulado a volumen total corregido.</li> <li>-Programación simple para el usuario, de periodos de muestreo con tiempos de encendido y parada, incluyendo secuencias múltiples diarias y semanales.</li> <li>-Interfaz Serial RS232 para descargar fácilmente la información a una PC.</li> <li>-Rango de flujo volumétrico: 1.0 - 4.5 l/min (Programable)</li> <li>-Precisión de flujo: +/- 2% de la lectura.</li> <li>-Registro digital interno de Información, registra digitalmente lo siguiente:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>-Fecha, Hora</li> <li>-Presión Barométrica (mmHg)</li> <li>-Temperatura (°C)</li> <li>-Flujo (l/min)</li> <li>-Volumen Total Acumulado (litros)</li> <li>-Volumen Total Corregido (litros estándares)</li> <li>-Dimensiones: 300 mm (altura) x 170 mm (diámetro).</li> <li>-Peso del muestreador: 3.75kg.</li> <li>-Consumo de energía: 2.5 - 3 watts (depende de la carga del filtro)</li> <li>-Adaptador de 100 - 240 VAC a 12 VDC.</li> </ul> </li> </ul> <p>Incluye:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Cargador de batería</li> <li>-Batería</li> </ul>	21,186.44	21,186.44
SON VEINTICINCO MIL CON 00/100 SOL						
Importe		Total Dto. Uni.	Dto. Global %	Sub total	IGV 18.00 %	Total S/
21,186.44		-	-	21,186.44	3,813.56	25,000.00

**Figura 1:** Cotización del muestreador Microvol – 1100



**TECH PERU INDUSTRIAL S.A.C**  
**RUC:** 20603130457  
**Dirección:** Jr. Monserrate 395. Ofi. 902.  
 Surco-Lima- Perú  
**Web:** [www.techperuindustrial.com](http://www.techperuindustrial.com)  
**Teléfonos:** 5916761 / 991080462  
**Correos:** [rdominguez.criffer@gmail.com](mailto:rdominguez.criffer@gmail.com)  
[contacto@techperu.pe](mailto:contacto@techperu.pe)  
**Asesora Comercial:** Rubi Dominguez

**COTIZACION N° TP-965:**  
**MUESTREADOR DE PARTÍCULAS DE BAJO**  
**VOLUMEN 2.5 PARTISOL 2000I-BV**

\*VENTA

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	PRECIO	TOTAL
1	Muestreador de partículas de bajo volumen 2.5 Modelo Partisol 2000i-BV Marca Thermo Scientific	1	\$ 24,000.00	\$ 24,000.00

Subtotal	\$ 24,000.00
Impuesto %	18%
Total Impuesto	\$ 4,320.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 28,320.00</b>

**Términos y Condiciones:**

1. Se debe realizar abono del 100%
2. Tipo de Moneda: Dólares Americanos
3. Realizar Pagos a nombre de:  
 Tech Peru Industrial SAC  
 N° de cuenta Soles BCP: 194-2508672-0-20  
 C.C.I.: 002-194-002508672020-95  
 N° de cuenta Dolares BCP: 194-2505915-1-81  
 C.C.I.: 002-194-00250591518198  
 N° de cuenta detracción Banco de la Nación: 00-058-291242
4. Tiempo de entrega: 5 SEMANAS

**Figura 2:** Cotización del muestreador Partisol 2000i

<b>Cliente</b>		<b>RUC</b>	20131380951
<b>Dirección</b>	JR. CAMANA NRO. 566 CERCADO DE LIMA LIMA	<b>F. Emisión</b>	07-06-2019
<b>Atención</b>	George Castelar / 999019309	<b>Línea Cred</b>	
<b>Forma de pago</b>	De acuerdo a bases administrativas	<b>Sede</b>	SEDE PRINCIPAL
<b>Ejecutivo de ventas</b>	JUAN CONTRERAS VALDIVIA	<b>Id#</b>	844

* CANT	UNI	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	V.UNI	IMPORTE
1 1.00	Uni	ECO-HVS3000-PM 2.5	Muestreador de partículas en aire de alto volumen para PM2.5, Modelo: HIVOL3000, Marca: ECOTECH  Especificaciones técnicas: - Incluye cabezal para PM2.5 - Control Activo de Flujo Volumétrico, con control por Microprocesador que mantiene un flujo promedio constante incluso con incremento de partículas. - Flujo Volumétrico: Programable de 45 a 96 m3/hr - Precisión de flujo: Mejor de ± 1m3/hr. - Repetibilidad de flujo: ± 1% de la lectura. - Temperatura de operación de 0°C ? 50°C - Datalogger interno propio: Registro digital de Fecha, Hora, Presión, Temperatura, Flujo, Volumen total acumulado, volumen total corregido a condiciones estándares y total de horas de funcionamiento del motor. - Fabricación del equipo con aluminio anodizado. - Motor Industrial sin Escobillas (cien mil horas de operación continua, no usa carbones y por lo tanto está libre de mantenimiento, no requiere consumibles). - LCD Integrado - Programación de encendido y apagado - Interfaz Serial RS232 para descarga de datos. - Incluye Software de descarga a PC. - Baja corriente de arranque: Menos de 4A - Voltaje: 220VAC / 60Hz - Incluye capacitación en el manejo y uso del equipo, descarga de los datos a una PC, manejo de la data, programación del equipo.	59,322.03	59,322.03

SON SETENTA MIL CON 00/100 SOL

Importe	Total Dto. Uni.	Dto.Global %	Sub total	IGV 18.00 %	Total S/
59,322.03	-	-	59,322.03	10,677.97	70,000.00

Figura 3: Cotización del muestreador Hivol – 3000



**COTIZACION N° 001-7383**

GREEN GROUP PE SAC-20537082934  
 Av. AVIACION 4210 SURQUILLO  
 info@greengroup.com.pe  
 Tlf. 560-6134

Cliente UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
 Dirección AV. LA MOLINA NRO. SN  
 LIMA - LIMA - LA MOLINA  
 Atención  
 Forma de pago 50% por adelantado y saldo contra entrega.  
 Ejecutivo de ventas PERLECHE SANDOVAL JACQUELINE

RUC 20147897406  
 F. Emisión 08-11-2018  
 Línea Cred  
 Sede PRINCIPAL  
 Id# 7483

* CANT	UNI	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	DTO%	P.UNI	IMPORTE
1	1.00 Uni	VAR106	Caja de Filtro de Fibra de Vidrio de 8 x 10 pulgadas 2.2 um 100 und para Hivol Whatman (G653)		836.05	836.05
2	1.00 Uni	VAR080	Filtro de Teflón de 47mm de diámetro para PM2.5 (Paquete de 50 und) Marca: Whatman (7592-104) Diámetro: 47mm Con aro de soporte de PP , c/u viene numerado		1,735.60	1,735.60
3	1.00 Uni	VAR140	Filtro de Cuarzo de 47mm x 2.5 um pqte 100 und Whatman (1851-047)		720.30	720.30
4	1.00 Uni	PA002U	Cassete porta filtro 47mm. Thermo - Unidad (59-004648-0001)		216.40	216.40
5	1.00 Uni	BGI010	Porta Filtro de 47mm BGI PQ100 / PQ200 (F212)		218.78	218.78
6	1.00 Uni	AL002	Porta Filtro de 47mm Alaric (FC47NC) Compatible con BGI PQ100 / PQ200. Malla con numero de serie grabado.		178.40	178.40
7	1.00 Uni	HV011	Porta filtro de 8 x 10 Tisch (TE-3000)		581.08	581.08

SON CINCO MIL DOSCIENTOS NOVENTA Y CUATRO CON 20/100 SOLES

Importe	Total Dto. Uni.	Dto.Global %	Sub total	IGV 18.00 %	Total S/
4,425.18	-0.81	0.00	4,486.61	807.59	5,294.20

**Figura 4: Cotización de papel filtro**

**Anexo 11: Certificados de calibración de los muestreadores Microvol – 1100, Partisol 2000H y Hivol - 3000**



## Certificado de Calibración

**LF - 3112018**

---

Pág 1 de 1

1. **Cliente** : UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
2. **Dirección** : Av. La Molina S/N - La Molina
3. **Datos del Instrumento**

<b>Instrumento de medición</b> : Muestreador Microvol	<b>Intervalo de indicación</b> : 1,0 L/min a 4,5 L/min
<b>Marca</b> : Ecotech	<b>Serie</b> : 1b-1 / #0
<b>Modelo</b> : MicroVol 1100	<b>Resolución</b> : 0,001 L/min
<b>Código Interno</b> : No Indica	<b>Precisión (±)</b> : 2% de la lectura *
4. **Lugar de Calibración** : Laboratorio de flujo de aire - Green Group PE S.A.C.
5. **Fecha de Calibración** : 2018-11-12
6. **Condiciones Ambientales** :

	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%H.R.)	Presión atmosférica (mbar)
Inicial	24,9	59,7	997,4
Final	23,9	52,3	996,2
7. **Trazabilidad**

Patrón	Código Interno	Nº de Certificado	F. Vencimiento
Medidor de flujo	GGP-05	193152	2019-10-27
Termómetro	GGP-02	T-1553-2017	2019-06-09
Barómetro	GGP-02	LFP-227-2017	2019-07-04
8. **Método de Calibración.**

La calibración se realizó por comparación del instrumento con patrones trazables según "PCG-005 Procedimiento para la Calibración de Medidores de Flujo - Green Group"
9. **Resultado de Medición.**

Patrón (L/min)	Instrumento (L/min)	Corrección (L/min)	Incertidumbre (L/min)
1,951	1,975	-0,024	0,012
2,961	2,974	-0,013	0,011
3,930	3,968	-0,038	0,012

	Patrón	Instrumento	Corrección
Verificación	T (°C)	23,30	22,95
	Presión (mmHg)	748,6	748,2
10. **Observaciones:**

\*) Dato tomado del manual del instrumento.

  - . La Incertidumbre de medición expandida reportada es la incertidumbre de medición estándar multiplicada por el factor de cobertura k=2 de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.
  - . Los resultados emitidos son válidos solo para el instrumento en el momento de la calibración.
  - . Se recomienda al usuario recalibrar a intervalos adecuados, los cuales deben ser elegidos con base a las características del instrumento.
  - . La incertidumbre declarada en el presente certificado ha sido estimado siguiendo las directrices de: "Guía para la expresión de la incertidumbre de medida" primera edición, septiembre 2008 CEM.
  - . El certificado de calibración solo puede ser dudado completamente y sin modificaciones, sin firma y sellos carecen de validez.

Fecha de Emisión

2018-11-12



**ISAÍAS CURI MELGAREJO**  
Jefe de Laboratorio de Calibración  
GREEN GROUP PE S.A.C

LA IMPRESIÓN DE ESTE CERTIFICADO CONSTITUYE UNA COPIA DEL ORIGINAL EN VERSIÓN ELECTRÓNICA (FIRMA DIGITAL SEGÚN LEY N° 27269 LEY DE FIRMAS Y CERTIFICADOS DIGITALES) FO-[LC-PR-01]-03

Av. Aviación 4210 - Surquillo
Central: 560-6134 / 273-3550
www.greengroup.com.pe

\*EL USO INDEBIDO DE ESTE CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LEY

**Figura 1: Certificado de calibración para el muestreador Microvol – 1100**

1. **Ciente** : UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
2. **Dirección** : Av. La Molina S/N - La Molina
3. **Datos del Instrumento**
  - Instrumento de Medición** : Muestreador de Partículas **.Rango** : 45 m<sup>3</sup>/h - 96 m<sup>3</sup>/h
  - Marca** : Ecotech **.Serie** : 15-1682
  - Modelo** : Hivol 3000
  - Identificación** : 602264070001
4. **Lugar de Calibración** : Laboratorio de Flujo de Aire - Green Group PE S.A.C.
5. **Fecha de Calibración** : 2018-11-14
6. **Método de Calibración**

La calibración fue realizada de acuerdo al EPA Compendium Method IO - 2.1.

7. **Condiciones Ambientales.**

	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%H.R.)	Presión Atmosférica (mbar)
Inicial	23,2	67,6	998,9
Final	23,4	65,3	998,7

8. **Trazabilidad.**

Patrón Usado	Código Interno	If Serie /Certificado	F. Vencimiento
Calibrador Variflow	G GP-73	9380	2019-05-15
Manómetro Diferencial Digital	G GP-23	LFP-324-2017	2019-09-21
Barómetro	G GP-02	LFP-227-2017	2019-07-04
Termómetro	G GP-02	T-1553-2017	2019-06-08

9. **Resultados**

Ta (°K)	: 295	Presión (in hg):	29,49	Constante "c"	: 3,85560
Ta (°C)	: 22,2	Pa (mmHg)	749,2		

Corrida	Qa	ΔH	ΔH	% de
Número	m <sup>3</sup> /h	mmH2O	mmH2O	Diferencia
1	60,00	108,30	112,1	3,51%
2	70,00	147,30	152,5	3,53%
3	80,00	192,40	199,4	3,64%

Incertidumbre de medición: 0,508 mm H2O

Verificación	T (°C)	Patrón	Instrumento	Corrección
		23,3	22,95	0,35
	Presión (mmHg)	754,3	754,2	0,1

10. **Observaciones**

- a) El método de referencia establece que se debe tener un % de diferencia menor al +/- 4%.
  - b) El tiempo mínimo de estabilización del motor antes de la calibración fue de 15 minutos.
  - c) Para el proceso de calibración se utilizó el procedimiento que indica el manual del fabricante.
- \* Dato tomado de una etiqueta pegada al instrumento.
- .. La incertidumbre de medición expandida reportada es la incertidumbre de medición estándar multiplicada por el factor de cobertura k=2 de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.  
 .. Los resultados emitidos son válidos solo para el motor y controlador de flujo instalados, en el momento de la Calibración.  
 .. Se recomienda al usuario recalibrar a intervalos adecuados, los cuales deben ser elegidos en base a las características del instrumento.  
 .. La incertidumbre de clarada en el presente certificado ha sido estimado siguiendo las directrices de: "Guía para la expresión de la incertidumbre de medida" primera edición, septiembre 2008 CEM.  
 .. El certificado de Calibración solo puede ser difundido completamente y sin modificaciones, sin firmas y sellos carecen de validez.

Fecha de Emisión

2018-11-14

ISAÍAS CÚRI MELGAREJO  
Jefe de Laboratorio de Calibración  
GREEN GROUP PE S.A.C

Figura 2: Certificado de calibración para el muestreador Hivol – 3000

1. Cliente : UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
 2. Dirección : Av. La Molina s/n Lima-Lima-La Molina.

3. Datos del Instrumento

Instrumento de medición	: Muestreador de Partículas	Flujo de Trabajo	: 16,7 L/min
Marca	: Partisol	Serie	: 2000B207240401
Modelo	: 2000-H	Resolución	: 0,1 L/min
Código Interno	: No indica		

4. Lugar de Calibración: : Laboratorio de flujo de aire - Green Group PE S.A.C.

5. Fecha de Calibración: : 2016-06-21

6. Condiciones Ambientales :

	Temperatura	Humedad relativa	Presión atmosférica
Inicial	22,5 °C	58,8 % H.R.	998,2 mbar
Final	22,5 °C	59,0 % H.R.	998,1 mbar

7. Trazabilidad.

Patrón	Código Interno	Nº Lote/Certificado	F. Vencimiento
Patrón primario de flujo de rango alto	GGP-05	5065605	2016-10-09
Termómetro	GGP-02	T-1613-2015	2017-06-22
Barómetro	GGP-02	GP-0160-2015	2017-06-23

8. Método de Calibración.

Calibración Multipunto de Flujo según manual de fabricante y comparados con patrón trazable.

9. Resultado de Medición.

Patrón	Instrumento	Corrección	Incertidumbre
15,09	15,0	0,09	0,04
16,77	16,7	0,07	0,05
18,20	18,0	0,20	0,05

Obs: Todos los flujos en L/min

Verificación	Patrón		Instrumento	
	T (°C)	22,5	22,4	
	Press (atm)	746,3	746	

10. Observaciones:

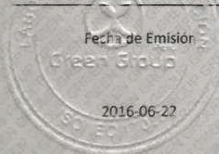
1) La precisión del control de flujo del instrumento es de  $\pm 4\%$  del valor seteado.

La Incertidumbre de medición expandida reportada es la incertidumbre de medición estándar multiplicada por el factor de cobertura  $k=2$  de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.  
 Los resultados emitidos son válidos solo para el instrumento y filtro adecuado, en el momento de la calibración.

Se recomienda al usuario recalibrar a intervalos adecuados, los cuales deben ser elegidos con base a las características del instrumento.

La incertidumbre declarada en el presente certificado ha sido estimado siguiendo las directrices de: "Guía para la expresión de la incertidumbre de medida" primera edición, septiembre 2008 CEM.

El certificado de calibración solo puede ser difundido completamente y sin modificaciones, sin firma y sellos carecen de validez.



Jefe de Laboratorio de  
Calibración

Enzo Barrera



FO-[LC-PR-01]-03

Figura 3: Certificado de calibración para el muestreador Partisol 2000H

## Anexo 12: Registro fotográfico

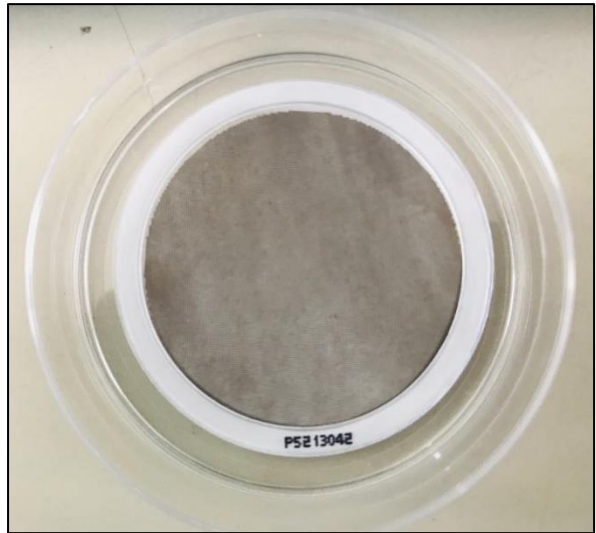


**Figura 1:** Área de estudio – Azotea del Laboratorio de Ingeniería Ambiental (UNALM)





(a)



(b)

**Figura 2:** Filtro de teflón (a) sin muestra (b) con muestra

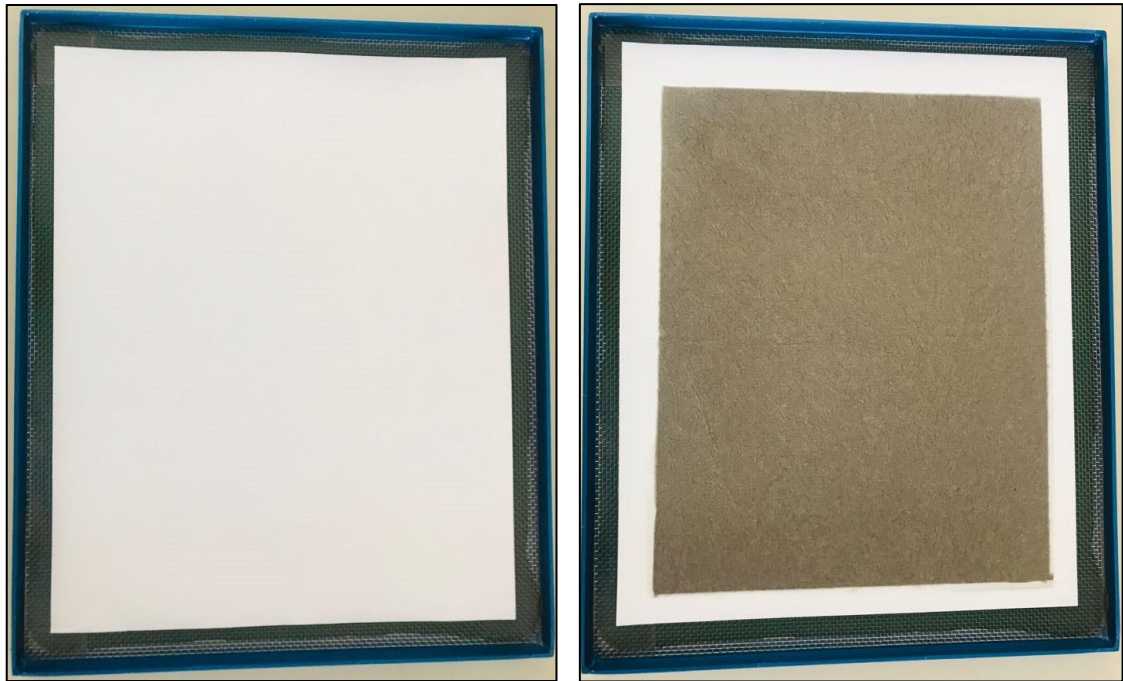


(a)



(b)

**Figura 3:** Filtro de cuarzo (a) sin muestra (b) con muestra



(a)

(b)

**Figura 4:** Filtro de vidrio (a) sin muestra (b) con muestra



**Figura 5:** Toberas del Hivol – 3000 para PM<sub>2,5</sub>



**Figura 6:** Toberas del Partisol 2000H para PM<sub>10</sub>



**Figura 7:** Impactador del Partisol 2000H tipo WINS para PM<sub>2,5</sub>



**Figura 8:** Impactador del Microvol – 1100 para  $PM_{10}$



**Figura 9:** Impactador del Microvol – 1100 para  $PM_{2.5}$



**Figura 10:** Limpieza de la entrada de aire del muestreador Partisol 2000H



**Figura 11:** Limpieza del muestreador Hivol - 3000