

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR MATERIAL PARTICULADO
SEDIMENTABLE EN LA ZONA URBANA DE HUÁNUCO DE AGOSTO
A OCTUBRE DEL 2016**

Tesis

Para optar el título profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

PATRICIA CHÁVEZ PÉREZ

Tingo María – Perú

2018



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María – Perú



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 06 de Noviembre de 2017, a horas 8:00 a.m. en la Sala de Sesiones del Departamento Académico de Ciencias Ambientales de la Facultad de Recursos Naturales Renovables, para calificar la Tesis titulada:

“CONTAMINACIÓN DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO SEDIMENTABLE EN LA ZONA URBANA DE HUÁNUCO DE AGOSTO A OCTUBRE DEL 2016”

Presentado por la Bachiller **CHÁVEZ PÉREZ, Patricia**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara APROBADA con el calificativo de “**MUY BUENO**”

En consecuencia, la sustentante queda apta para optar el Título de **INGENIERO AMBIENTAL**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para la otorgación del Título correspondiente.

Tingo María, 14 de Noviembre del 2017

Dr. LUCIO MANRIQUE DE LARA SUÁREZ
PRESIDENTE

Blgo. CÉSAR AUGUSTO GOZME SULCA
VOCAL

Ing. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO
VOCAL

Ing. MSc. VÍCTOR MANUEL BETETA ALVARADO
ASESOR



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR MATERIAL PARTICULADO SEDIMENTABLE
EN LA ZONA URBANA DE HUÁNUCO DE AGOSTO A OCTUBRE DEL 2016**

Autor : PATRICIA CHÁVEZ PÉREZ

Asesor : Ing. MSc. VÍCTOR MANUEL BETETA
ALVARADO

Programa de Investigación : Calidad del aire

Línea (s) de Investigación : Evaluación de contaminantes

Eje Temático de Investigación : Contaminación del aire

Lugar de Ejecución : Zona Urbana de Huánuco

Duración : Fecha de Inicio : Noviembre 2015
Término : Octubre 2016

Financiamiento :

FEDU	:	S/ 55.00 soles
Propio	:	S/ 3,000.00 soles

DEDICATORIA

A Dios porque siempre estuvo conmigo mostrándome su amor incondicional, por ser mi guía, mi fortaleza y mi motivación frente a adversidades.

A mis padres Gilbert y Jeanne por ser mi motor y motivo para seguir siempre adelante, por su constante apoyo y confianza, por su dedicación, su tiempo y su paciencia en todo este tiempo.

A mis amigos (as) por sus consejos, por su motivación, su tiempo, buenos deseos y sus palabras de aliento, por su confianza y apoyo incondicional.

A mis primas(os) y demás familiares, por estar siempre conmigo mostrándome su apoyo y cariño incondicional y motivándome en todo.

A las dos personas especiales en mi vida Julio y Karenn por ser mi apoyo, mi fortaleza y mi motivación en medio de todo, por su gran amor y su paciencia.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser mi guía y mi fortaleza, por su fidelidad y su amor incondicional, porque nunca me desampara y siempre está mostrándome su camino y su verdad, porque a pesar mis errores y pecados siempre está dispuesto a perdonarme.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva por ser mi alma mater y albergarme en sus aulas durante mi formación profesional.

A la Facultad de Recursos Naturales Renovables y a los docentes del Departamento Académico de Ciencias Ambientales por contribuir en mi formación profesional, por brindarme sus conocimientos y experiencias adquiridas.

Al Ing. Víctor Beteta Alvarado, asesor de este trabajo de investigación por su amistad y apoyo incondicional durante todo este tiempo, por sus exigencias y motivación y sobre todo por sus sabios consejos.

A mis padres y hermanos por todo el esfuerzo que hicieron para darme una profesión y hacer de mí una persona de bien, gracias por los sacrificios y la paciencia que demostraron todos estos años, gracias por su apoyo incondicional y su amor sin medida en cada etapa de mi vida personal y

profesional, gracias por sus consejos por ser mi ejemplo mi motivación y por nunca perder la fe en mí, gracias a ustedes he llegado a donde estoy.

A mi tía Elizabeth Pérez, por su gran apoyo en mi formación profesional, por sus sabios consejos y por siempre confiar en mí.

A mis grandes y mejores amigos (as) Miguel Briceño, Yhordan Falcón, Ronel Palma, Diana Huamán, Jhanes Huamán, Gaby Álvarez, Marilyn Chacón, Evelyn Cabrera por su amistad, sus consejos, por su motivación en todo este tiempo.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1.	Antecedentes	4
2.2.	Definición de aire	6
2.3.	Contaminación del aire	6
2.4.	Clasificación de contaminantes	8
2.4.1.	Según su naturaleza.....	8
2.4.2.	Según su origen	9
2.4.3.	Según sus fuentes	9
2.5.	Dispersión de los contaminantes atmosféricos.....	10
2.6.	Transporte de contaminantes.....	10
2.6.1.	Principios de transporte y dispersión	10
2.6.2.	Transporte de los contaminantes.....	11
2.7.	Material particulado atmosférico.....	11
2.7.1.	Fuentes de emisión de material particulado.....	13
2.7.2.	Clasificación del material particulado	14
2.7.3.	Composición del material particulado	18
2.7.4.	Ciclo de vida del material particulado	19
2.7.5.	Velocidad de sedimentación	20

2.7.6.	Mecanismos de deposición y captación.....	21
2.8.	Efectos del material particulado sedimentable	22
2.8.1.	Efectos en el medio ambiente.....	22
2.8.2.	Efectos sobre el clima.....	22
2.8.3.	Efectos sobre los ecosistemas	23
2.8.4.	Riesgos en la salud	23
2.8.5.	Efectos sobre los materiales o propiedades	24
2.8.6.	Otros efectos	24
2.9.	Inhalación de partículas	25
2.10.	Medición de material particulado sedimentable.....	26
2.11.	Métodos de monitoreo de material particulado sedimentable.....	27
2.11.1.	Método pasivo de monitoreo de partículas	27
2.11.2.	Método activo de monitoreo de partículas	28
2.11.3.	Método gravimétrico	29
2.12.	Selección de sitios de monitoreo.....	29
2.13.	Equipos para la medición de material particulado	31
2.13.1.	Equipos que utilizan el método gravimétrico de alto caudal	31
2.13.2.	Equipos que utilizan el principio de la dispersión de luz.....	31

2.14.	Marco normativo aplicable al estudio de contaminación del aire	32
2.15.	Factores meteorológicos que influyen en la concentración del Material Particulado Sedimentable	33
2.15.1.	Temperatura	34
2.15.2.	Vientos	34
2.15.3.	Dirección del viento	35
2.15.4.	Velocidad del viento	35
2.15.5.	Rosa de los vientos	36
2.15.6.	Turbulencia mecánica	36
2.15.7.	Turbulencia térmica	36
2.15.8.	Altura de la capa de inversión	37
2.15.9.	Insolación	37
2.15.10.	Precipitación	38
2.15.11.	Topografía	39
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	40
3.1.	Lugar de investigación	40
3.1.1.	Características climatológicas	40
3.1.2.	Características geográficas	40
3.2.	Materiales	41
3.2.1.	Materiales	41

3.2.2. Equipos	42
3.3. Tipo de investigación	42
3.3.1. Muestra	42
3.4. Metodología	43
3.4.1. Determinación de material particulado sedimentable	43
3.4.2. Comparación de los resultados de la cuantificación de material particulado sedimentable por los dos métodos	50
3.4.3. Determinación de los puntos de mayor contaminación por material particulado sedimentable.....	51
3.4.4. Influencia de los factores meteorológicos en la concentración de material particulado sedimentable	51
3.5. Variables	52
3.5.1. Variable dependiente	52
3.5.2. Variable independiente	52
IV. RESULTADOS	53
4.1. Cuantificación del material particulado sedimentable	53
4.1.1. Mes de agosto	53
4.1.2. Mes de setiembre	55
4.1.3. Mes de octubre.....	57
4.1.4. Por distritos	62
4.2. Comparación de los resultados de los dos métodos	66

4.3.	Puntos de mayor contaminación por material particulado sedimentable.....	68
4.4.	Influencia de los factores meteorológicos en la concentración del material particulado sedimentable	70
V.	DISCUSIÓN	74
VI.	CONCLUSIÓN	78
VII.	RECOMENDACIONES.....	79
VIII.	ABSTRACT	80
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	81
X.	ANEXO.....	87

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Focos de emisión de contaminantes	8
2. Tipos de residuos inertes en material particulado.....	19
3. Ventajas y desventajas de los muestreadores pasivos.....	28
4. Ventajas y desventajas de los muestreadores activos.....	29
5. Valores de límites máximos permisibles para Perú	32
6. Valores de límites máximos permisibles para algunos países de América Latina.....	33
7. Ubicación de los puntos de monitoreo.....	41
8. Esquema del análisis de varianza	50
9. Concentración de material particulado sedimentable del mes de Agosto	54
10. Concentración de material particulado sedimentable del mes de setiembre.....	55
11. Concentración de material particulado sedimentable del mes de octubre	57
12. Concentración promedio por punto y mes de monitoreo de material particulado sedimentable ($\text{mg}/\text{cm}^2 \times 30 \text{ días}$) para ambos métodos.....	59
13. Concentración de material particulado sedimentable por distrito ($\text{mg}/\text{cm}^2 \times \text{mes}$).....	62

14.	Concentración promedio de material particulado sedimentable y el límite máximo permisible establecido por la OMS.....	68
15.	Concentración de material particulado sedimentable y parámetros meteorológicos.....	70
16.	Análisis de varianza para el método de tubos pasivos.....	88
17.	Análisis de varianza para el método de placas receptoras.....	88
18.	Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales.....	89
19.	Análisis de regresión de los dos métodos de monitoreo.....	89
20.	Comparación de los dos métodos.....	90
21.	Coeficiente de correlación y de determinación entre las variables meteorológicas y concentración de material particulado sedimentable.....	90
22.	Temperatura máxima diaria (°C).....	91
23.	Temperatura mínima diaria (°C).....	92
24.	Precipitaciones diarias (mm).....	94
25.	Dirección de viento diaria 07 Horas.....	95
26.	Dirección de Viento Diaria 13 Horas.....	97
27.	Dirección de Viento Diaria 19 Horas.....	98
28.	Velocidad de Viento a las 07 Horas (m/s).....	100
29.	Velocidad de Viento a las 13 Horas (m/s).....	101
30.	Velocidad de Viento a las 19 Horas (m/s).....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Dinámica de la contaminación del aire	7
2. Penetración de partículas de distinto tamaño en el sistema respiratorio	26
3. Esquema del equipo de monitoreo de placas receptoras	44
4. Esquema del equipo de monitoreo de tubos pasivos.....	47
5. Concentración de material particulado sedimentable del mes de agosto	54
6. Concentración de material particulado sedimentable por los dos métodos, correspondientes al mes de setiembre	56
7. Concentración de material particulado sedimentable por los dos métodos, correspondientes al mes de octubre.....	58
8. Concentración promedio de material particulado sedimentable por meses, método de tubos pasivos	60
9. Concentración promedio de las muestras de material particulado sedimentable por meses, método de placas receptoras	61
10. Concentración de material particulado sedimentable por distritos, método de tubos pasivos.....	63
11. Concentración de material particulado sedimentable por distritos, método de placas receptoras	64

12. Concentración promedio por distrito de material particulado sedimentable, para ambos métodos	65
13. Concentración promedio de material particulado sedimentable, por puntos de monitoreo	66
14. Gráfico de regresión comparando la cuantificación de material particulado sedimentable por los dos métodos	67
15. Concentración promedio del material particulado sedimentable vs Límite Máximo Permisible	69
16. Correlación entre material particulado sedimentable y la precipitación	71
17. Correlación entre material particulado sedimentable y la temperatura.	72
18. Correlación entre material particulado sedimentable y la velocidad del viento	73
19. Materiales para la preparación de las muestras	104
20. Rotulado de los tapones y las placas.....	105
21. Preparación de la vaselina para su fundición.....	105
22. Fundición de la vaselina para ser vertida en las placas	106
23. Vaselina líquida	106
24. Vertiendo la vaselina en las placas Petri	107
25. Muestras preparadas para el método de placas receptoras	107
26. Pesado de las placas contenidas con vaselina	108
27. Muestras preparadas de las placas receptoras cubiertas con papel de aluminio para ser trasladadas	108

28.	Caja conservadora (tecnopor) para el traslado de las muestras	109
29.	Secado de los filtros para obtener peso constante	109
30.	Pesado de los tapones de los tubos	110
31.	Pesado de los tapones que contienen el papel filtro	110
32.	Cubierta de aluminio para los tapones.....	111
33.	Recojo de muestras de los tubos pasivos.....	111
34.	Recojo de muestras de las placas receptoras	112
35.	Pesado de las muestras colectadas por el método de tubos pasivos	112
36.	Filtración del agua que contiene material particulado sedimentable	113
37.	Filtros contenidos con material particulado sedimentable	113
38.	Ubicación de los filtros en las placas para ser colocadas en la estufa	114
39.	Secado de los filtros que contienen material particulado sedimentable	114
40.	Desecando los filtros que contienen material particulado sedimentable	115
41.	Papel filtro desecado que contiene material particulado sedimentable	115
42.	Muestras colectadas por el método de placas receptoras	116
43.	Pesado de las muestras de placas receptoras	116
44.	Muestras colectadas del punto 5 (La Esperanza) por el método de placas receptoras	117

45. Muestras colectadas en el punto 4 (Huánuco) por el método de tubos pasivos.....	117
46. Muestras colectadas del punto 1 (Cayhuayna alta) por el método de placas receptoras	118
47. Rosas de viento.....	118
48. Ubicación de los puntos de monitoreo	119

RESUMEN

En la ciudad de Huánuco se observa gran cantidad de material particulado sedimentable; esto se debe sobre todo a la gran cantidad de vehículos que circulan diariamente, al crecimiento poblacional y factores naturales como la geografía, la velocidad y dirección del viento; es por ello que se realizó el estudio con el objetivo de determinar el grado de contaminación del aire por material particulado sedimentable por los métodos de tubos pasivos y placas receptoras. Se establecieron 7 puntos de monitoreo, distribuidos en los distritos de Huánuco, Amarilis y Pillco Marca. Los resultados obtenidos nos indica que todos los puntos de monitoreo superan el límite máximo permisible establecido por la Organización Mundial de la Salud. La concentración promedio de material particulado sedimentable es de 4,9924 y 11,4847 mg/cm²/30días, para el método de tubos pasivos y placas receptoras respectivamente; asimismo el punto de mayor concentración es la urbanización Predio el Tingo y el de menor concentración el Asentamiento Humano Arcoragra. Al aplicar la Prueba t – Student, se obtuvo que hay diferencia significativa en la cuantificación de material particulado sedimentable por los dos métodos, siendo el método de placas receptoras el de mayor precisión; por lo que es más recomendable el uso de este método. Asimismo se determinó que los parámetros meteorológicos como la precipitación, temperatura y velocidad del viento tienen una correlación negativa con la concentración de material particulado sedimentable.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es un problema de salud ambiental que afecta a países desarrollados y en desarrollo de todo el mundo. En el Perú la contaminación del aire afecta mayormente a las zonas urbanas, originada principalmente por factores de contaminación industrial, doméstica y vehicular. El mayor contribuyente de la contaminación es el parque automotor; según el Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA), en el 2015 alcanzó un total de 2,5 millones de vehículos; cantidad que se ha incrementado en casi el doble en los últimos 10 años; este parque automotor es uno de los más obsoletos, debido principalmente a la masiva importación de unidades usadas en años previos sin una regulación adecuada.

Uno de los principales contaminantes del aire es el material particulado atmosférico, el cual juega un papel importante como causante de efectos perjudiciales en la salud humana, asociado a eventos de mortalidad y morbilidad en la población, en el cambio climático y en los ecosistemas, es por ello que el material particulado actualmente es uno de los contaminantes atmosféricos más estudiados en el mundo.

En la ciudad de Huánuco debido a su geografía, velocidad y dirección del viento y otros factores como: el crecimiento del parque automotor, crecimiento poblacional e invasión de zonas erosivas, quema de carbón en

restaurantes, calles no pavimentadas, etc.; se observa gran contaminación del aire por material particulado sedimentable, que en tiempo de secas es arrastrado por el viento y puede ser ingerido o respirado por la población, causando efectos perjudiciales en la salud.

En este contexto y en virtud de que no existen estudios publicados sobre contaminación del aire por material particulado sedimentable en la ciudad de Huánuco, resulta de vital importancia llevar a cabo este tipo de estudios, que nos permitirá conocer a nivel descriptivo el grado de contaminación del aire por material particulado sedimentable, que aporte información necesaria para adoptar medidas de corrección eficaces.

Por lo que se planteó la siguiente interrogante ¿Cuál es el grado de contaminación del aire por material particulado sedimentable en la zona urbana de Huánuco? Formulándose asimismo la hipótesis de que: La contaminación del aire por material particulado sedimentable en la zona urbana de Huánuco es alta, que supera el $0,5 \text{ mg/cm}^2/30\text{días}$, nivel máximo permisible establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

En este trabajo se determinó la concentración de material particulado sedimentable en la zona urbana de Huánuco (distritos: Amarilis, Huánuco y Pillco Marca), por el método de tubos pasivos y placas receptoras. Los análisis se realizaron en el laboratorio de Fisicoquímica de la Universidad Nacional Hermilio Valdizán de Huánuco.

Objetivo general

Determinar el grado de contaminación del aire por material particulado sedimentable en la zona urbana de Huánuco.

Objetivos específicos

- Cuantificar el material particulado sedimentable obtenido en los puntos de monitoreo.
- Comparar los resultados de la cuantificación de Material Particulado Sedimentable por los métodos de Tubos Pasivos y Placas Receptoras.
- Detectar los puntos de contaminación en los que hay mayor concentración de material particulado sedimentable.
- Establecer la influencia de los factores meteorológicos (temperatura, precipitación y velocidad del viento) en las concentraciones de material particulado sedimentable.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

En el estudio “Contaminación del Aire por Material Particulado en la Ciudad Universitaria – UNMSM”, realizado en 23 puntos de la universidad, se obtuvieron los siguientes resultados: el punto de mayor concentración se ubica en la loza deportiva de la Facultad de Química ($1,45\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$); en el comedor provisional de estudiantes ($0,86\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$), superior al LMP en 172%; en la Avenidas Venezuela y Colonial ($1,45\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$ y $0,8\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$); valores superiores al LMP en 290% y 160%, respectivamente. Asimismo la velocidad promedio del viento en la estación meteorológica ubicada en el DAIMF es de 3,25 m/s, la dirección del viento es de N20°E (MARCOS y VALDERRAMA, 2012).

En el estudio comparativo para la determinación del polvo atmosférico sedimentable empleando las metodologías de Tubo Pasivo y de Placas Receptoras en la Ciudad Universitaria de San Marcos – Lima; los resultados obtenidos muestran que el método de tubos pasivos presenta mayor concentración de material particulado a comparación de las placas receptoras; el punto 2 ubicado en el Módulo de Comercio y Servicios puerta N°3 supera los límites máximos de concentración a comparación de los demás puntos, siendo el pico más alto el segundo punto de monitoreo con $1,156\text{ mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$ el método de placas receptoras y con $1,586\text{ mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$ con el método de tubos

pasivos. El cuarto punto de monitoreo sufre un incremento en su concentración y esto se debe principalmente a la cercanía con las obras de construcción (MARCOS et al. 2012).

En el estudio “Determinación del Grado de Partículas atmosféricas Sedimentables, mediante el Método de Muestreo Pasivo, Zona Urbana- Ciudad de Moyobamba 2012”, se obtuvo un valor promedio final de partículas de 0,70 mg/cm²/mes en las estaciones de monitoreo, que sobrepasa el límite máximo permisible en 0,20 mg/cm²/mes, establecido por la OMS. Asimismo se determinó la existencia de una relación directa entre las condiciones meteorológicas y la generación de partículas sedimentables. Además se determinó que no existe diferencia significativa entre los datos obtenidos (LOZANO, 2012).

En el estudio “Comparación de los métodos de Bergerhoff y Placas Receptoras para la Cuantificación de Polvo Atmosférico Sedimentable”; con el método de Bergerhoff se obtuvieron en época seca resultados que oscilan entre 1,8104 y 4,0139 mg/cm²/30días, y en época lluviosa valores entre 12,2401 y 20,1355 mg/cm²/30días sobrepasándose en ambas épocas el límite máximo permitido que establece la Organización Mundial de la Salud (0,5 mg/cm²/30días); mientras que con el método de placas receptoras se observan valores inferiores que varían entre 0,3483 y 0,7794 mg/cm²/30días en época seca; y valores que oscilan entre 0,0006 y 0,0011 mg/cm²/30días en época lluviosa. Asimismo se determinó que existe diferencia significativa en la cuantificación de polvo con los dos métodos, siendo el método de Bergerhoff el de mayor precisión y el más recomendable (CORLETO y CORTEZ, 2012).

Dando cumplimiento al Plan Estudio de la Contaminación del Aire por Contaminantes Sólidos Sedimentables (CSS) en la Ciudad de Huánuco, se recogieron las muestras en 5 puntos de monitoreo (ubicados en los distritos de Pillco Marca, Amarilis y Huánuco), utilizando el método de las placas, obteniéndose resultados promedios en Pillco Marca de 20,95 Tn/km²/30días, en Huánuco 16,7 Tn/km²/30días y en Amarilis 41,32 Tn/km²/30días, que superan el límite máximo permisible establecido por la OMS de 5Tn/km²/30días (SENAMHI, 2016).

2.2. Definición de aire

El aire es una mezcla de elementos constitutivos de nitrógeno, oxígeno, vapor de agua; el 78 % del aire es nitrógeno y 21% oxígeno; el uno por ciento (1%) restante incluye pequeñas cantidades de sustancias, como el dióxido de carbono, metano, hidrógeno, argón, helio, y gases inerte (RIVERA, 2012).

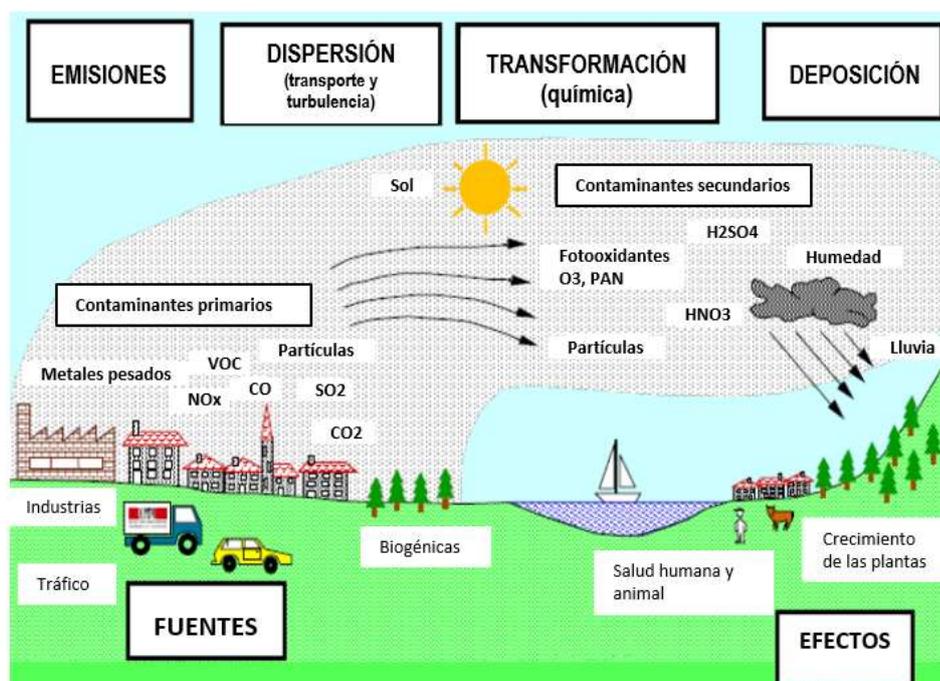
La Organización Mundial de la Salud (OMS) define al aire puro como la mezcla de gases, vapor de agua y partículas sólidas y líquidas cuyo tamaño varía desde 14 nanómetros (nm) hasta 0,5 milímetros (mm), los cuales en su conjunto envuelven el globo terrestre (MOREANO y PALMISANO, 2012).

2.3. Contaminación del aire

El término contaminación del aire se refiere a la presencia en el aire de materias o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave para las personas o bienes de cualquier naturaleza; las fuentes de estos

contaminantes pueden ser los incendios forestales y las erupciones volcánicas, las actividades humanas en los procesos industriales, la calefacción y el tráfico, entre otras (BARRIOS, 2007).

El crecimiento económico y la urbanización, asociados al desarrollo de diversas actividades como la industria petrolera, los servicios, la agroindustria y el incremento de las unidades automotoras, traen como resultado un consumo intenso de combustibles fósiles; asimismo, la práctica de actividades agropecuarias no apropiadas inciden en la generación de elevados volúmenes de contaminantes, que al relacionarse con las condiciones ambientales pueden dañar la salud humana, los ecosistemas y los recursos materiales (ROMERO *et al.*, 2006). En las grandes urbes, la mayor parte de la contaminación atmosférica es generada por emisiones del parque automotriz y de las fuentes industriales; en la Figura 1 se muestra la dinámica de la contaminación del aire (RUIZ, 2006).



Fuente: MIRANDA y ORTIZ (2008).

Figura 1. Dinámica de la contaminación del aire.

El problema de la contaminación del aire se relaciona con la densidad de partículas, gases y la capacidad de dispersión, teniendo en cuenta la formación de lluvia ácida y sus posibles efectos perjudiciales sobre los ecosistemas (RIVERA, 2012).

2.4. Clasificación de contaminantes

2.4.1. Según su naturaleza

Se clasifican en naturales y antropogénicos. Los naturales son aquellos emitidos directamente a la atmósfera por acción de la naturaleza; como partículas y óxidos de azufre producido por vulcanismo, incendios forestales y descomposición de la materia orgánica en el suelo y en los océanos; mientras que los antropogénicos son originados y emitidos por la acción del hombre; como el CO producidos por la combustión incompleta de vehículos, partículas, SO_x, NO_x, aldehídos, amoníaco, CO, producidas por actividades industriales y agrícolas, en el Cuadro 1 se muestran los focos de emisión (BARRIOS, 2007).

Cuadro 1. Focos de emisión de contaminantes.

Contaminante	Antropogénicos (%)	Naturales (%)
Aerosoles	11,3	88,7
Óxidos de Azufre	42,9	57,1
Monóxido de Carbono	9,4	90,6
Monóxido de Nitrógeno	11,3	88,7
Hidrocarburos	15,5	84,5

Fuente: CARRANZA (2004).

2.4.2. Según su origen

Las partículas se clasifican en primarias y secundarias. Las primarias son aquellas que se emiten directamente a la atmósfera desde una fuente identificable, como los gases producidos por los automóviles o los expelidos por las chimeneas de las fábricas. Entre los más importantes están el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO₂), el dióxido de nitrógeno (NO₂), los hidrocarburos (HC), las partículas, y los metales (SEMIQUÉ, 2015).

Los contaminantes atmosféricos secundarios se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y fotoquímicas que sufren los contaminantes primarios en el seno de la misma. (MIRANDA y ORTIZ, 2008); algunos de los contaminantes secundarios son el ozono (O₃), el ácido sulfhídrico (H₂S) y los hidrocarburos oxidados (SEMIQUÉ, 2015).

2.4.3. Según sus fuentes

Los contaminantes emitidos a la atmósfera dependerán de la clasificación de las fuentes: por su ubicación espacial, estacionarias como las chimeneas de las calderas y móviles como los vehículos automotores; por su estado de agregación como emisoras de gases SO₂, H₂S, CO, NO, etc. y como emisores de material particulado (polvo, aerosoles, humo, niebla, etc.) y por la composición química de los contaminantes emitidos, se clasifican en emisores de sustancias orgánicas hidrocarburos, aldehídos, cetonas y ácidos orgánicos (BARRIOS, 2007).

2.5. Dispersión de los contaminantes atmosféricos

Los procesos atmosféricos tales como los vientos y el intercambio de calor, controlan el destino de los contaminantes los cuales son expuestos a procesos de transporte, dispersión, transformaciones químicas, físicas y remoción. El viento, la humedad, la inversión y las precipitaciones tienen un papel importante, ya que éstas contribuyen en el aumento o disminución de la contaminación. El viento generalmente favorece la difusión de los contaminantes ya que favorece la acumulación de humos y polvo (GONZALEZ, 2012).

Los contaminantes atmosféricos están generalmente sometidos a tres procesos: emisión, transmisión e inmisión. La emisión es la expulsión del contaminante desde una fuente a la atmósfera, por ejemplo las chimeneas o escapes de vehículos y los volcanes. La transmisión es la distribución y las posibles transformaciones químicas del contaminante en la atmósfera. La inmisión es la cantidad o concentración del contaminante que es recibido por un receptor y por ende es registrado también por cualquier equipo de medición de contaminación atmosférica. Receptores son los seres humanos, las plantas, los animales, pero también edificios y otros bienes materiales (BLASER, 2000).

2.6. Transporte de contaminantes

2.6.1. Principios de transporte y dispersión

El transporte y dispersión de contaminantes del aire están influenciados por variaciones del clima y las condiciones topográficas locales. La

velocidad del viento afecta en gran medida la concentración de contaminantes en un área, mientras mayor sea, menor será la concentración. El movimiento y la mezcla constante del aire crea condiciones inestables y dispersa el aire contaminado, cuando hay una ligera mezcla vertical o no hay mezcla, los contaminantes permanecen en la zona baja y en concentraciones mayores (MOREANO, 2012).

2.6.2. Transporte de los contaminantes

Los procesos para el transporte se dan por deposición seca y húmeda. La deposición seca es la recaudación directa de especies gaseosas y particuladas sobre una superficie; los procesos involucrados son complejos y se puede considerar en términos de la “velocidad de deposición” que es una combinación de la concentración atmosférica y la resistencia de la superficie a la deposición. Para la Deposición húmeda se debe considerar la incorporación de contaminantes en las nubes que se liberan cuando hay una precipitación o una combinación de ambos. Una vez más, este es un proceso complejo, que implica la intensidad de la lluvia, su origen y la exposición previa de la superficie (MOREANO, 2012).

2.7. Material particulado atmosférico

El material particulado atmosférico es el conjunto de partículas sólidas o líquidas presentes en suspensión en la atmósfera (a excepción del agua pura), por causas naturales o antropogénicas. Este término engloba tanto a las partículas en suspensión como a aquellas con un diámetro aerodinámico

mayor de 20 μ m, denominadas partículas sedimentables, caracterizadas por presentar un tiempo de vida bajo en la atmósfera (apenas unas pocas horas) (ALDABE, 2011).

Entre los contaminantes atmosféricos particulados, está la fracción sedimentable y la fracción de partículas en suspensión. La primera está formada por partículas más grandes, que permanecen en el aire por cortos períodos de tiempo, depositándose en el suelo por su tamaño y grosor. La segunda corresponde a las partículas que se dispersan en la atmósfera de una forma casi estable y homogénea y, por lo tanto, permanecen en suspensión durante un cierto tiempo, hasta que son eliminadas por precipitación. Las partículas sedimentables, es creado básicamente por el rompimiento de grandes partículas en procesos tales como: trituración, pulverización, perforaciones, explosiones; en la mezcla de materiales y operaciones como: transporte, tamizado, barreduras (MALDONADO, 2012).

Las partículas se identifican como partículas totales en suspensión de diámetro inferior o igual a 100 μ m, partículas inhalables en suspensión (MP10) con tamaño menores o iguales a 10 μ m y partículas finas (MP2,5) con tamaños menores o iguales a 2,5 μ m (CARRANZA, 2004).

La variación cualitativa y cuantitativa de las partículas atmosféricas depende, entre otros elementos, de la dirección y velocidad de los vientos, de la ubicación y el tamaño del local estudiado y de la estación del año (VIVAR y BORREGO, 2012).

2.7.1. Fuentes de emisión de material particulado

2.7.1.1. Según el tipo de fuente generadora

Se clasifican como naturales y antropogénicas: algunas partículas sólidas provienen de fuentes naturales como el rocío del agua de mar, partículas de polen, polvo, erupciones volcánicas, y procesos geotérmicos; así como las partículas arrastradas por los vientos, provenientes de la erosión del suelo. Estas partículas tienden a ser gruesas y con cortos tiempos de permanencia en la atmósfera. Las fuentes antropogénicas de material particulado incluyen procesos industriales de extracción; generación de calor doméstico e industrial; de combustibles fósiles; actividades de transporte, almacenamiento y traslado de materiales; circulación de vehículos (MALDONADO, 2012).

2.7.1.2. Según la naturaleza de las partículas emitidas

Según la naturaleza de las partículas emitidas, se clasifican en fuentes primarias y secundarias. Las fuentes primarias que pueden ser fuentes de áreas geológicas como polvo proveniente de carreteras o procesos agrícolas; fuentes estacionarias como los procesos de combustión y fuentes móviles dentro de las cuales se encuentran la combustión de gasolina y diésel, emisión de gases, desgaste de llantas y frenos. Las fuentes secundarias pueden ser inorgánicas tales como NO_x y SO_2 provenientes de fertilizantes (utilizado en las actividades agrícolas), transportes y suelos, y fuentes orgánica provenientes de procesos de combustión y carbón de los cuales se originan los VOC's (MALDONADO, 2012).

Asimismo se clasifican en fuentes fijas (emisiones generada por la quema de combustibles), móviles (emisiones provenientes de vehículos) y fugitivas (emisiones provenientes de calles pavimentadas y no pavimentadas, así como de la construcción, demolición, entre otros) (REGALADO, 2015).

2.7.2. Clasificación del material particulado

2.7.2.1. Según su origen

Se clasifican en natural o antropogénico. Las partículas naturales son las que proceden de emisiones no causadas por actividades humanas, tales como erupciones volcánicas, actividades sísmicas y geotérmicas, incendios forestales, fuertes vientos, aerosoles marinos, resuspensión atmosférica y transporte de partículas naturales de regiones áridas. Las partículas antropogénicas derivan de los procesos de combustión, tráfico, actividades domésticas (material carbonoso); también se incluye el material mineral asociado a procesos de demolición y erosión del pavimento, frenos y neumáticos (ALDABE, 2011).

Las principales fuentes de contaminación antrópicas se encuentran en zonas urbanas e industriales; destacan el tráfico, las emisiones tanto canalizadas como fugitivas derivadas de la actividad industrial, las emisiones generadas en actividades de construcción y demolición, algunas actividades agrícolas, del transporte marítimo y las emisiones procedentes del sector residencial y servicios. El tráfico rodado constituye generalmente la fuente más importante de partículas primarias. Las actividades agropecuarias generan

también amonio que reacciona con gases ácidos para dar lugar a partículas secundarias. Los cultivos también emiten vapores orgánicos que dan lugar a partículas orgánicas secundarias (INZA, 2010).

2.7.2.2. Según su mecanismo de formación

Según su proceso de formación se clasifica en primario o secundario. Las partículas primarias son aquellas que se encuentran en la forma que se emitieron, como resultado de procesos físicos o químicos propios de la fuente emisora (MALDONADO, 2012), tales como el polvo en suspensión o las partículas emitidas por una chimenea (ALVARADO, 2010). Las partículas naturales primarias principales proceden de las regiones áridas, océanos, volcanes y la vegetación; mientras que las partículas antropogénicas primarias están ligadas a las emisiones del tráfico rodado y las actividades industriales (ALDABE, 2011).

Las Partículas secundarias son aquellas resultantes de las transformaciones químicas de precursores gaseosos como los óxidos de azufre y nitrógeno, amonio y compuestos orgánicos de origen natural o antrópico. La transformación de gas a partícula puede producirse a través de procesos de nucleación, condensación y crecimiento (ALDABE, 2011).

La formación de partículas secundarias se da a partir de los procesos de coagulación (donde las partículas colisionan entre sí, adhiriéndose para formar partículas más grandes), nucleación a partir de vapor sobresaturado con

la presencia de un núcleo de condensación (heterogénea) o no (homogénea), condensación simultánea o consecutivo (ALVARADO, 2010).

2.7.2.3. Según su tamaño

El tamaño del material particulado es un parámetro muy importante en la determinación de efectos, tasa de deposición, tiempo de residencia en la atmósfera y destino de las partículas atmosféricas. Además, el tamaño de las partículas tiene gran relevancia en sus propiedades, en el comportamiento en la atmósfera y en las posibilidades de ser inhalada o capturada en los sistemas o equipos diseñados para su estudio (ALVARADO, 2010).

Partículas finas

Se denominan partículas finas a aquellas que poseen un diámetro $<1\mu\text{m}$, mientras que en epidemiología esta definición abarca hasta las partículas de diámetro $<2,5\ \mu\text{m}$ (ALDABE, 2011).

Las partículas más finas, con diámetros de 0.005 a 0.1 micras entran a la atmósfera en su mayor parte por condensación de vapor caliente provenientes de fuentes de combustión. Con el tiempo (por lo general varias horas) estas partículas más pequeñas crecen, en su mayor parte por aglomeración de cada una de ellas sobre las otras. Parte de esta aglomeración ocurre en la fase gaseosa, causada por el movimiento browniano que las lleva a que entren en contacto; parte ocurre en el interior de las nubes o gotas de niebla (AGUEDO, 2008).

Las partículas de tamaño mediano (0,1 a 1 μ) se forman parcialmente por la aglomeración de partículas más finas y, en parte, por la conversión química de gases y vapores en partículas de la atmósfera. Estas partículas son bastante grandes como para ser removidas por la lluvia (captación o lavado). Aunque crecen por aglomeración para formar partículas más grandes, este proceso es lento en comparación con la compactación y lavado por la lluvia (AGUEDO, 2008).

Estimaciones realizadas, determinan que para partículas en el rango de 0,1 - 10 μ m el tiempo de residencia en la atmósfera es cercano a una semana, en cambio en la estratósfera es de meses a años (ALVARADO, 2010).

Partículas gruesas

Incluye partículas de diámetros entre 2,5 μ m y 10 μ m. Aquellas partículas con un diámetro inferior o igual a 10 μ m son denominadas aerosoles respirables (MALDONADO, 2012). En ciencias de la atmósfera se consideran partículas gruesas a aquellas partículas de diámetro >1 μ m. Además, clásicamente se diferencian las partículas ultrafinas ($<0,1$ μ m) y las nanopartículas ($<0,05$ μ m) (ALDABE, 2011).

Las partículas más grandes con diámetro de 2 a 100 μ m se generan, en forma mecánica; algunas provienen de fuentes industriales de partículas. En su mayor parte estas partículas son removidas por la sedimentación y por la gravedad, con la acción de las nubes, lluvia o sin ella (AGUEDO, 2008).

Partículas suspendidas totales

Son partículas que se encuentran en el aire y cuyos diámetros son hasta 50 μm . Las partículas de diámetros mayores a los 50 μm , no permanecen en la atmósfera por largos períodos de tiempo y caen por efecto de la gravedad, por lo que son consideradas como partículas sedimentables (MALDONADO, 2012).

Las partículas más finas presentan una mayor repercusión en los procesos de dispersión de energía entrante y producen por tanto un “efecto enfriador” de la atmósfera; mientras que las partículas de mayor tamaño fomentan los procesos de absorción de radiaciones de onda larga produciendo por lo tanto un forzamiento positivo en el clima (DE PASCUAL, 2011).

2.7.3. Composición del material particulado

El material particulado está constituido por material sólido o líquido en forma de partículas inertes y vivas, con excepción del agua no combinada, presente en la atmósfera en condiciones normales. Las partículas inertes, están formadas por residuos orgánicos e inorgánicos. En el Cuadro 2 se detalla los componentes de los residuos orgánicos e inorgánicos; las partículas vivas están formadas principalmente los granos de polen, esporas y bacterias; en menor grado semillas, insectos, algas. El material particulado interactúa con diferentes sustancias presentes en el aire, formando especies químicas orgánicas e inorgánicas (MALDONADO, 2012).

Cuadro 2. Tipos de residuos inertes en material particulado.

Residuos orgánicos		Residuos inorgánicos
Origen vegetal	Origen animal	
Fragmentos de madera, algodón, almidón, fibras diversas.	Lana, seda, epidermis, plumas, escamas.	Carbonatos, cloruros, sílice, sulfatos, arcilla, yeso, hollín, alquitrán, carbón, metales y minerales.

Fuente: MALDONADO (2012).

Los principales componentes del material particulado atmosférico son: sulfato, nitrato, amonio, ion hidrógeno, agua adherida a las partículas, carbono elemental y una gran variedad de compuestos orgánicos, aerosol marino y otros. En estudios realizados en Estados Unidos indican que elementos de la corteza como calcio, aluminio, sílice, magnesio, hierro y materia orgánica (polen, esporas, restos de plantas y animales) son predominantes en la fracción gruesa del material particulado (ALVARADO, 2010).

2.7.4. Ciclo de vida del material particulado

Existen fenómenos que influyen de manera significativa en el ciclo de vida de las partículas como la emisión y dispersión; este último afecta, por ejemplo, a las diferencias en los niveles de concentración másica de partículas tanto entre estaciones del año como entre los periodos día-noche. También se encuentra el fenómeno de transporte que conduce la transferencia partículas de unas localizaciones pequeñas o grandes distancias (BORRÁS, 2013).

La mayor parte de las partículas tienen una corta existencia, debido a que rápidamente se precipitan por gravedad o se impactan por el viento en superficies. Así, en la práctica, en la atmósfera hay poca cantidad de partículas que exceden 20 μm en diámetro, excepto en áreas muy cercanas a las fuentes de emisión (ESTEVEZ, 2010).

Finalmente, las partículas llegan a la superficie formando parte de las precipitaciones colisionando unas con otras en el camino; este proceso se denomina deposición húmeda, siendo el principal sumidero de material particulado atmosférico. La deposición de partículas sin precipitación es lo que se denomina deposición seca producida principalmente por el transporte convectivo y por procesos de difusión y adhesión a la superficie terrestre. Este tipo de deposición es menos importante en una escala global, pero es muy relevante con respecto a la calidad del aire local, a los efectos sobre la salud humana y al ensuciamiento de los edificios y monumentos (BORRÁS, 2013).

2.7.5. Velocidad de sedimentación

Intuitivamente, se debería pensar que todas las partículas deberían sedimentar y depositarse sobre la superficie terrestre de forma rápida bajo la influencia de la gravedad, pero eso no es así; para las partículas más pequeñas (tamaño menor a 2,5 μm) pueden tener tiempos de residencia de días o incluso semanas y podrían ser transportadas miles de kilómetros. Las partículas de tamaño mayor a 2,5 μm tienen tiempos de residencia de minutos a horas y pueden ser transportadas hasta unos pocos centenares de kilómetros. De

acuerdo con la Ley de Stokes, una partícula que posee la mitad de diámetro de otra caerá cuatro veces más lentamente (PARRA, 2013).

2.7.6. Mecanismos de deposición y captación

Las partículas esféricas no higroscópicas se depositan en el tracto respiratorio por tres mecanismos principales: impactación inercial, sedimentación gravitacional, y difusión Browniana. La primera ocurre cuando las partículas entran en el flujo de aire a través de un tubo a gran velocidad depositándose en la pared. La sedimentación gravitacional ocurre cuando las partículas se depositan fuera de la corriente de aire por la fuerza de la gravedad. La deposición por difusión depende del diámetro de la partícula; partículas más pequeñas se difunden más rápidamente. Cuando las partículas disminuyen en tamaño ($<0,01 \mu\text{m}$) ellas comienzan a comportarse de manera similar a un gas de alta reactividad y se difunden relativamente rápido hacia las paredes de la vía aérea (ESTEVEZ, 2010).

Según su tamaño, para las partículas con diámetros mayores a $0,5 \mu\text{m}$, la sedimentación e impactación son los principales mecanismos de deposición. Para partículas menores a $0,5 \mu\text{m}$ en diámetro, la impactación y sedimentación son menos importantes, y la difusión Browniana es el mecanismo dominante. La deposición de pequeñas partículas ($<0,5 \mu\text{m}$) pueden coalescer por fuerzas electroestáticas. Este mecanismo puede ser importante en el ámbito ocupacional donde los procesos mecánicos responsables de generación de aerosoles pueden causar una gran formación de partículas (ESTEVEZ, 2010).

2.8. Efectos del material particulado sedimentable

Los efectos derivados del material particulado atmosférico son muy variados y dependen de la concentración y las propiedades físico-químicas de las partículas. El problema más conocido es el efecto negativo que ejerce en la salud humana, a continuación se describen los efectos más relevantes causados por el material particulado sedimentable (ALDABE, 2011).

2.8.1. Efectos en el medio ambiente

Además de los efectos sobre la salud, los aerosoles generan consecuencias climáticas derivadas de la capacidad de algunos aerosoles de absorber, dispersar y reflejar radiación. Pueden modificar los niveles de visibilidad, asimismo tienen efectos sobre ecosistemas y degradan materiales de construcción (MALDONADO, 2012). También participan en las reacciones químicas heterogéneas de la atmósfera, influyendo en la abundancia y distribución de los gases de efecto invernadero y de otras especies gaseosas muy reactivas (BORRÁS, 2013).

2.8.2. Efectos sobre el clima

Las partículas tienen un papel importante en la regulación del clima, ya que influyen en la formación de las nubes y su vida media, así como en el balance radiactivo global. A su vez, las nubes pueden ser una fuente de material particulado, ya que contribuye un medio adecuado para que se produzcan reacciones de transformación gas-partícula. Una vez formadas las partículas, si

la nube se evapora, éstas permanecerán en suspensión. Por el contrario, si se produce la precipitación, dichas partículas serán lavadas de la atmósfera. Por otra parte, el material atmosférico puede causar un forzamiento en el balance de energía terrestre a través de mecanismos directos e indirectos (ALDABE, 2011).

2.8.3. Efectos sobre los ecosistemas

Los ecosistemas también sufren los efectos de la exposición al material particulado atmosférico, bien como depósito seco o húmedo. Las partículas de mayor diámetro, pueden reducir la capacidad de intercambio gaseoso al depositarse sobre las hojas de las plantas, así como afectar a la fotosíntesis; cuando éstas se depositan sobre la superficie terrestre, las concentraciones de metales presentes en ellas, pueden afectar a las características edáficas e inhibir funciones como la toma de nutrientes por parte de las plantas. Asimismo, puede contribuir a la acidificación y eutrofización de suelos y aguas superficiales, lo que a su vez puede repercutir sobre la composición de las aguas subterráneas (ALDABE, 2011).

2.8.4. Riesgos en la salud

El material particulado puede tener diversos efectos en la salud como: efecto fibrogénico, efectos irritantes, efectos alérgicos, efectos carcinogénicos, efectos tóxicos sistemáticos, efectos en la piel. Las partículas finas como las gruesas pueden acumularse en el sistema respiratorio y están asociadas con numerosos efectos negativos en la salud. La Organización

Mundial de la Salud insiste en que, para este tipo de contaminantes, no existe un valor bajo el cual se considera inofensivo para la salud humana y que la gravedad de los daños está relacionada con los tiempos de exposición. (MALDONADO, 2012).

2.8.5. Efectos sobre los materiales o propiedades

El material particulado provoca efectos nocivos en: materiales metálicos (provocando la corrosión), circuitos eléctricos (por abrasión mecánica y acción química), edificios (por acumulación de polvo en la estructura, ensuciándola, decolorándola o dañando la superficie), también se produce una disminución del tiempo que duran los tejidos (telas, paño, lino, lana, etc.) (BARRIOS, 2007).

2.8.6. Otros efectos

Reducción de la visibilidad, la visibilidad puede verse afectada por la absorción o dispersión de la radiación en el espectro visible, Los aerosoles de tamaños comprendidos entre 1,4 y 0,8 micras son los que tienen una mayor influencia en la dispersión de la luz solar, debido a la proximidad de su tamaño a la longitud de onda de la luz visible (CARRANZA, 2004).

Asimismo en los entornos urbanos, el material particulado puede contribuir a la alteración de los materiales y su interacción con ellos. La reacción de compuestos ácidos (SO_2) con superficies pétreas, provocan la generación de costras negras. Además, la reacción de las partículas depositadas con el

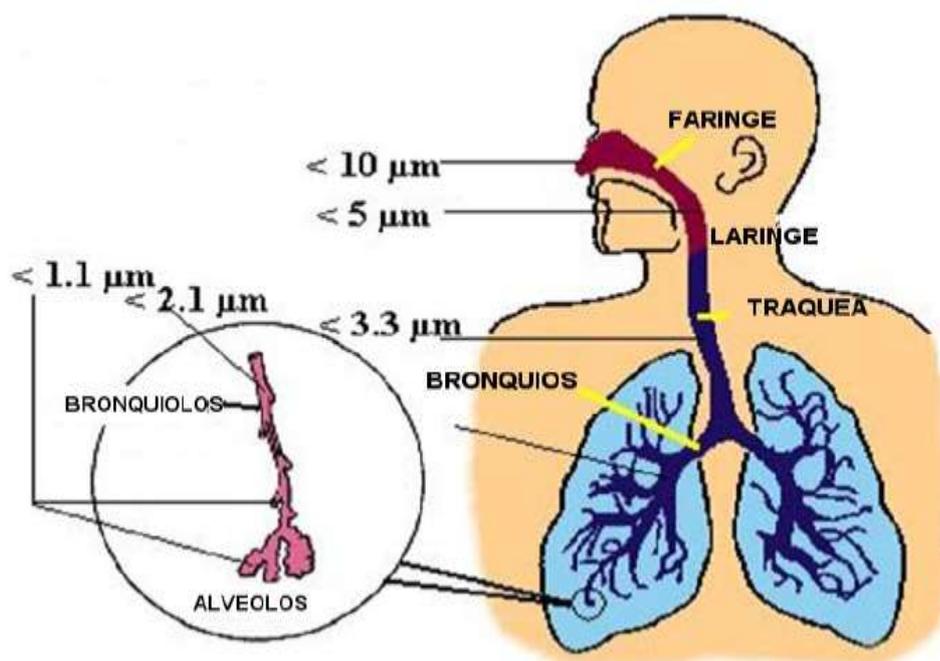
substrato puede dar lugar a graves problemas de corrosión de los materiales, especialmente en el caso de estructuras metálicas, y a la rotura de las mismas debido a la formación de CaSO_4 , que al expandirse provoca fisuras en los materiales calizos (ALDABE, 2011).

2.9. Inhalación de partículas

El diámetro de una partícula es muy importante ya que determina que la partícula sea o no “respirable”. Se considera que las partículas menores a $10\ \mu\text{m}$ pueden ser inhaladas (esta fracción del aerosol atmosférico se designa como PM_{10} y es considerada como la fracción inhalable) y aquellas partículas de diámetro inferior a $3,5\ \mu\text{m}$ que son respirables. El tamaño de la partícula determina, también, en qué lugar del tracto traqueo-bronquial quedará retenida y su peligrosidad relativa. Las partículas más pequeñas se depositan en los alvéolos pulmonares, mientras que las de diámetro en torno a $15\ \mu\text{m}$ o mayores son retiradas en las fosas nasales (DE MIGUEL, 1995).

Según ROMERO *et al.* (2006), el material particulado respirable se divide en dos tipos de acuerdo a su tamaño, las partículas menores a 10 micras (PM_{10}) y las partículas de diámetro inferior a 2,5 micras ($\text{PM}_{2,5}$). Las partículas inferiores a 2,5 micras ($\text{PM}_{2,5}$) son muy pequeñas, casi 100 veces más delgadas que un cabello humano; agrupan a partículas sólidas o líquidas generalmente ácidas, que contienen hollín y otros derivados de las emisiones de vehículos y fábricas. Éstas son respirables al 100% y pueden alojarse en los bronquios, bronquiolos y alveolos pulmonares. Mientras que las partículas de 10 micras

(PM₁₀) son 20 veces más pequeñas que un cabello, pero igualmente pueden ingresar al sistema respiratorio, en la Figura 2 se muestra la ubicación de las partículas en el sistema respiratorio de acuerdo al diámetro de las partículas.



Fuente: ALVARADO (2010).

Figura 2. Penetración de partículas de distinto tamaño en el sistema respiratorio.

2.10. Medición de material particulado sedimentable

Entre las técnicas de muestreo de polvo atmosférico sedimentable se encuentra el muestreo con colectores y en superficies adhesivas. A pesar de que se efectúan mediante análisis gravimétricos, existen grandes diferencias en los resultados obtenidos por los diferentes métodos de muestreo incluso pueden llegar a presentarse inconsistencias de cerca del 50%, por esta razón las mediciones de polvo atmosférico son relativas al dispositivo empleado (CORLETO y CORTEZ, 2012).

El análisis gravimétrico es un método analítico cuantitativo en el cual la determinación de las sustancias se lleva a cabo por una diferencia de pesos (peso final – peso inicial). Existen métodos de muestreo para conocer la concentración de una muestra en solución, que se llevan a cabo por precipitación de la muestra por medio de la adición de un exceso de reactivo y otros en los que directamente se pesa el material colectado en el papel filtro. En este último método, se determina la masa, pesando el papel filtro antes y después del muestreo con una balanza a temperatura y humedad relativa controladas (CORLETO y CORTEZ, 2012).

2.11. Métodos de monitoreo de material particulado sedimentable

2.11.1. Método pasivo de monitoreo de partículas

Este método de muestreo pasivo para partículas, colecta un contaminante específico por medio de su adsorción y/o absorción en un sustrato químico seleccionado. Después de su exposición por un período adecuado de muestreo, que puede variar desde una hora hasta meses o inclusive un año, la muestra se regresa al laboratorio donde se realiza la desorción del contaminante para ser analizado cuantitativamente. Los equipos utilizados se conocen como muestreadores pasivos, que se presentan en diversas formas y tamaños, principalmente en forma de tubos o discos. En el Cuadro 3 se muestra las ventajas y desventajas de los muestreadores pasivos, que se deben considerar al momento de definir el tipo de muestreador a utilizar (LOZANO, 2012).

Cuadro 3. Ventajas y desventajas de los muestreadores pasivos.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Muy económicos - Muy simples - No dependen de cables de electricidad - Se pueden colocar en números grandes. - Útiles para sondeos, mapeos y estudios de línea base. 	<ul style="list-style-type: none"> - No ha sido probado para algunos contaminantes. - Solo suministran promedios semanales y mensuales. - Requieren mano de obra intensiva para su funcionamiento y el consiguiente análisis. - No existe un método de referencia para monitorear el cumplimiento. - Lenta generación de datos.

Fuente: DIGESA (2005).

2.11.2. Método activo de monitoreo de partículas

El método activo requiere de energía eléctrica para succionar el aire a muestrear a través de un medio de colección físico o químico. El volumen adicional de aire muestreado incrementa la sensibilidad, por lo que pueden obtenerse mediciones diarias promedio. Los muestreadores activos se clasifican en burbujeadores (gases) e impactadores (partículas); dentro de estos últimos, el más utilizado actualmente es el muestreador de alto volumen “High – Vol.” (Para PST, PM10 y PM2.5), en el Cuadro 6 se muestran las ventajas y desventajas de los muestreadores activos (LOZANO, 2012).

Cuadro 4. Ventajas y desventajas de los muestreadores activos.

Ventajas	Desventajas
- Económicos	- Suministran promedios diarios.
- De fácil manejo	- Requieren mano de obra
- Operación y rendimiento confiables.	intensiva para la recolección y
- Cuenta con base de datos	análisis de muestras.
históricos.	- Requiere análisis de
	laboratorio.

Fuente: DIGESA (2005).

2.11.3. Método gravimétrico

Uno de los métodos para la medición del material particulado es emplear principios gravimétricos. La gravimetría se refiere a la medición del peso. Las partículas se atrapan o recogen en filtros y se pesan. El peso del filtro con el contaminante recolectado menos el peso de un filtro limpio da la cantidad del material particulado en un determinado volumen de aire (CARRANZA, 2004).

2.12. Selección de sitios de monitoreo

Para la ubicación de los sitios de monitoreo, es necesario tomar en consideración factores generales como la información relativa a la ubicación de fuentes de emisiones, a la variabilidad geográfica o distribución espacial de las concentraciones de los contaminantes, las condiciones meteorológicas y la densidad de la población (DIGESA, 2005).

Algunas de las recomendaciones se presentan a continuación (DIGESA, 2005):

- Para asegurar el flujo lo más libre posible, se deben evitar árboles y edificios en un área de 10 metros alrededor del sitio de muestreo y no tomar muestras en las superficies laterales de los edificios.
- En lo posible, deben rechazarse las interferencias en las estaciones de muestreo, por la circulación local que depende de factores topográficos.
- Para minimizar los efectos de las fuentes locales, se recomienda instalar la estación de monitoreo a una distancia de por lo menos 20 metros de cualquier fuente industrial, doméstica o de carreteras con alto tráfico vehicular.
- La entrada del muestreador debe estar entre 1,5 y 4 metros sobre el nivel del piso. Una altura de 1,5 metros se utiliza para estimar exposiciones potenciales del ser humano a situaciones de gran carga de tráfico vehicular. Sin embargo, para evitar el vandalismo en algunos sitios de monitoreo, se prefiere instalar la toma de muestra a una altura de 2,5 metros.
- La entrada del muestreador no debe localizarse cerca de fuentes de contaminación, para evitar arrastres de plumas de chimeneas domésticas o industriales.
- Para medir los parámetros meteorológicos se recomienda instalar los instrumentos a una altura de 10 metros sobre el nivel del suelo, y tomar mediciones a diferentes alturas con el objeto de obtener gradientes térmicos.

2.13. Equipos para la medición de material particulado

Se clasifican en dos grandes grupos: equipos que utilizan el método gravimétrico de alto caudal y los que utilizan el principio de la dispersión de luz. En las mediciones hay muchas causas de error como interferencias, niveles de blancos, reproducibilidad de los métodos de muestreo y muestreo estadístico. Cada medida tiene un grado de incertidumbre debido a los límites de medición de los equipos y las personas que usan estos equipos (REGALADO, 2015).

2.13.1. Equipos que utilizan el método gravimétrico de alto caudal

En este tipo de equipos como el controlador de flujo de tipo volumétrico se utilizan filtros cuadrados de 30 x 45 cm, donde es captado el material particulado; la mayor ventaja que presentan estos equipos es su solidez para ser utilizados en exteriores, y la exactitud de los resultados obtenidos depende fundamentalmente en la precisión de la balanza que se utiliza para medir el peso de los filtros utilizados, sin embargo el tiempo que lleva obtener los resultados de una medición es alrededor de 3 a 4 días (REGALADO, 2015).

2.13.2. Equipos que utilizan el principio de la dispersión de luz

Estos equipos utilizan diferentes impactadores para poder medir PM_{10} o $PM_{2.5}$, utilizan un sensor óptico para detectar y medir el material particulado en concentraciones de hasta 100 (mg/m^3), adicionalmente utilizan una bomba de bajo caudal de flujo continuo la cual es utilizada también para la purga del equipo, asegurando así mediciones exactas (REGALADO, 2015).

2.14. Marco normativo aplicable al estudio de contaminación del aire

En el Perú no se presenta ninguna norma o ley con respecto a los límites máximos permisibles para material particulado sedimentable, sin embargo instituciones Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), cogen normas de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para establecer estudios de monitoreo de polvo sedimentable, en el Cuadro 5 se muestran los límites máximos permisibles para material particulado sedimentable para el Perú (MARCOS y VALDERRAMA, 2012).

Cuadro 5. Valores de límites máximos permisibles para Perú.

Institución	Tiempo promedio, días	Límites Máximo (mg/cm²/30 días)	Técnica y/o Método
Dirección General de salud ambiental (DIGESA)	30	0,5	Gravimétrico estudio de polvo sedimentable (jarras)
Servicio Nacional de Meteorología e Hidrografía (SENAMHI)	30	0,5	Gravimétrico estudio de polvo sedimentable, (jarras), polvo atmosférico sedimentable (Placas de vidrio)

Fuente: MARCOS y VALDERRAMA (2012).

En el Cuadro 6, se presenta los límites máximos permisibles para polvo sedimentable, valores establecidos se debe a su ubicación y zona geográfica.

Cuadro 6. Valores de límites máximos permisibles para algunos países de América Latina.

País	Tiempo promedio	Límites Máximo (mg/cm²/30Días)	Técnica
Argentina	30 días	1,0	Gravimetría
Suiza	30 días	0,6	Gravimetría
Costa Rica	30 días	1,0	Gravimetría
Ecuador	30 días	1,0	Gravimetría
Colombia	30 días	1,0	Gravimetría
Chile	30 días	0,5	Gravimetría
México	30 días	1,0	Gravimetría

Fuente: MARCOS y VALDERRAMA (2012).

2.15. Factores meteorológicos que influyen en la concentración del Material Particulado Sedimentable

La dispersión y propagación de contaminantes como partículas suspendidas totales y el ruido se encuentran directamente relacionadas con las condiciones meteorológicas presentes. Por este motivo la gran importancia de analizar el comportamiento de estos parámetros para observar cómo influyen en los niveles de concentración de los contaminantes en estudio (BARRIOS, 2007).

Existen factores topográficos y meteorológicos que influyen en la contaminación atmosférica, entre los que se pueden citar: topografía del terreno, edificaciones existentes, vientos: dirección y velocidad, lluvia, presión barométrica, espacio de difusión (área sobre la que se mueven los contaminantes y altura máxima a que pueden llegar las corrientes de aire) (ROMERO y DIEGO, 2006).

2.15.1. Temperatura

Los movimientos de la masa de gases y partículas en suspensión emitida sobre la atmósfera, son influenciados por la variación de temperatura y presión. Cuando se encuentra la baja atmósfera bien mezclada, la temperatura del aire seco disminuye 1°C por cada 100m de elevación. Cuando la temperatura de salida es elevada y la densidad de los gases es baja, esta se difundiría en la alta atmósfera hasta alcanzar una zona con la misma densidad; cuando los gases de salida no pueden ascender los contaminantes son obligados a difundirse en la baja atmósfera. Estas condiciones son la evidencia de que altas temperaturas favorecen la dispersión y disminuyen la concentración de los contaminantes en la atmósfera (BARRIOS, 2007).

2.15.2. Vientos

Es el movimiento del aire que puede desplazarse horizontal y verticalmente, en el ámbito global, los vientos son originados por la distribución desigual de la temperatura y la presión sobre la superficie de la tierra y

significativamente influenciada por la rotación de la tierra y por deformaciones topográficas (BARRIOS, 2007). Los vientos son elementos de gran importancia en la dispersión de contaminantes, en función de sus características: dirección, velocidad y turbulencia. La dirección señala la zona hacia la que se pueden desplazar los contaminantes (CORLETO y CORTEZ, 2012).

2.15.3. Dirección del viento

Indica el rumbo que toman los contaminantes emitidos a la atmósfera; es decir, si el viento sopla en dirección Este los contaminantes son dispersados hacia el Este; se dispersan en la misma dirección del viento (BARRIOS, 2007).

2.15.4. Velocidad del viento

Indican el tiempo de viaje de los contaminantes desde la fuente al receptor y la dilución del contaminante en dirección viento debajo de la fuente, por lo que se asegura que la dispersión de un contaminante atmosférico emitido viaja a la misma velocidad del viento hasta descender y la concentración del contaminante en el aire viento debajo de la fuente es inversamente proporcional a la velocidad del viento (BARRIOS, 2007). La velocidad del viento puede afectar en gran medida la concentración de contaminantes en un área, mientras mayor sea la velocidad del viento, menor será la concentración de contaminantes. El viento diluye y dispersa rápidamente los contaminantes en el área circundante (CARRANZA, 2004).

2.15.5. Rosa de los vientos

Es un diagrama diseñado para mostrar la distribución de la dirección y velocidad del viento, su frecuencia es un espacio y periodo de tiempo, La rosa de los vientos se encuentra dividida en dieciséis (16) direcciones: N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSO, SO, OSO, O, ONO, NO y NNO, cada dirección comprende veintidós punto cinco grados ($22,5^\circ$) de división, comenzando por el norte en el rango $350^\circ - 12^\circ$, por ejemplo una dirección de $48,5^\circ$ corresponde a una dirección de NE (BARRIOS, 2007).

2.15.6. Turbulencia mecánica

Es originada por remolinos que mezclan o diluyen los contaminantes en la atmósfera, debido a las fuerzas cortantes producidas por el viento cuando pasa sobre la superficie áspera de la tierra. La turbulencia mecánica aumenta con la velocidad del viento y son mayores sobre terrenos con accidentes topográficos (BARRIOS, 2007).

2.15.7. Turbulencia térmica

Se origina por el calentamiento o enfriamiento del aire en las capas bajas de la superficie terrestre. El calentamiento es producido por el sol, en el medio día con cielo claro y vientos ligeros, creándose un flujo de calor ascendente que calientan la superficie del suelo. El enfriamiento se produce gracias a que las radiaciones infrarrojas emitidas por la tierra en las horas de la

noche y con vientos ligeros enfrían el suelo, generando un flujo de aire frío desde la superficie (BARRIOS, 2007).

2.15.8. Altura de la capa de inversión

La inversión térmica se produce cuando la temperatura del aire aumenta con la altura por encima de la de la superficie terrestre, este fenómeno produce una fuerte acción limitadora en la dispersión de contaminantes. Todas las inversiones a nivel del suelo o a mayores elevaciones influyen en la dispersión de los contaminantes de manera horizontal y vertical, inhibiendo el mezclado atmosférico y por ende conduce a la acumulación y concentración de los contaminantes. Existen otros tipos de inversiones que, generalmente, se producen a más altura y que actúan como una capa que limita la dispersión de contaminantes en sentido vertical, incrementando notablemente las concentraciones de contaminantes en los estratos de aire que quedan bajo ellos (BARRIOS, 2007).

2.15.9. Insolación

La insolación es la tasa de radiación recibida del sol por unidad de superficie terrestre. El sol emite radiaciones electromagnéticas a la atmósfera, ésta última se encarga de debilitarla por medio de los fenómenos de absorción, dispersión y reflexión. La insolación depende de la altitud solar la cual es función de la época, del día o del año; cuando hay muchas nubes se disminuye la insolación, las horas de incidencia solar son clasificadas de forma cuantitativa

realizando la medición de 6 de la mañana a 6 de la tarde y se clasifican de la siguiente manera: totalmente nublado (0-1), nublado (1-4), parcialmente nublado (4-8), bastante soleado (8-12) (BARRIOS, 2007).

2.15.10. Precipitación

La precipitación es uno de los factores meteorológicos que influyen en la concentración de los contaminantes atmosféricos, ya que permite que los contaminantes sean retirados o lavados de la atmósfera por la lluvia. En épocas lluviosas existe mayor humedad relativa, disminuyendo así la acumulación de los contaminantes y reduciendo la contaminación atmosférica. Pero en el caso de metales pesados la remoción por lluvia es menor, por encontrarse en la atmósfera en forma de óxidos insolubles en el agua; y sus concentraciones puedan aumentar, causando así efectos perjudiciales a los ecosistema y a la población (BARRIOS, 2007).

Las condiciones atmosféricas de bajas presiones que suelen acompañar a las precipitaciones, favorecen la dispersión de los contaminantes (CORLETO y CORTEZ, 2012).

Asimismo la precipitación tiene un efecto beneficioso en el medio ambiente, porque lava las partículas contaminantes del aire y ayuda a minimizar las partículas provenientes de actividades como la construcción (que incluye también actividades como demolición, excavación, preparación de terreno) calles no pavimentadas y algunos procesos industriales (CARRANZA, 2004).

2.15.11. Topografía

Un factor importante para dispersión y transporte de contaminantes es la topografía; las grandes ciudades rodeadas de una topografía compleja como, valles o cadenas montañosas a menudo experimentan altas concentraciones de contaminantes del aire. Por ejemplo, las ciudades de Los Ángeles y México están ubicadas en cuencas rodeadas por montañas y experimentan altos niveles de contaminación atmosférica (CARRANZA, 2004). La influencia de la topografía en la dispersión de contaminantes atmosféricos, afecta directamente al flujo de aire.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de investigación

El trabajo de investigación se realizó en la zona urbana de la ciudad de Huánuco, en los distritos de Huánuco, Amarilis y Pillco Marca, provincia y departamento de Huánuco.

3.1.1. Características climatológicas

La ciudad de Huánuco tiene un clima templado y seco. La temperatura media anual es 18,7°C., de mayo a noviembre tiene un promedio de 24°C y de diciembre a abril la un promedio de 18°C. La precipitación media anual es 388 mm., la menor cantidad de lluvia ocurre en julio con un promedio mensual de 4 mm., y el mes con mayores precipitaciones es febrero con un promedio mensual de 63 mm.

3.1.2. Características geográficas

La región de Huánuco se localiza en un medio físico propio de los pisos ecológicos de Sierra y Selva Alta, pero a la provincia de Huánuco (provincia en donde se encuentran ubicados los distritos de Huánuco, Amarilis y Pillco Marca) corresponden mayormente los de Sierra. Es un territorio bastante accidentado conformado por valles, quebradas, montañas y altiplanicies, en cuya

configuración dominan hacia el Sur Oeste las estribaciones de la Cordillera de Huayhuash, en el Sur, el Centro y el Nor Este la cuenca del río Huallaga y sus afluentes locales.

Cuadro 7. Ubicación de los puntos de monitoreo

N° Estación	Dirección	Coordenadas		Altitud	Distrito
		X	y		
1	Calle Santa Ana Mz. C Lt.	0362318	8899508	1998	Pillco
	15 AA.HH. Arcoragra				Marca
2	Predio el Tingo Mz. A Lt. 1	0362332	8901055	1922	Huánuco
3	Ricardo Palma Mz. B Lt. 8	0362825	8901388	1930	Huánuco
4	Psj. Dos Aguas 135	0363339	8901426	1921	Huánuco
5	La Esperanza	0366116	8905571	1932	Amarilis
6	Jr. Los Nogales Lt. 9	0363632	8897590	1975	Pillco
					Marca
7	Jr. José Olaya Mz. B Lt. 15	0363983	8901224	1934	Amarilis

Fuente: Elaboración propia

3.2. Materiales

3.2.1. Materiales

Se utilizaron placas de Petri, papel filtro de fibra de vidrio, vaso precipitado, probeta, tubos de ensayo, varilla de agitación, espátula, embudo de vidrio, escobillas de cerdas, piseta, pinza metálica, guantes, tubos de pvc,

tapones de tubos, madera, alambre, calamina, cemento, clavos, martillo, serrucho, sierra, cinta aislante, bolsas herméticas, pintura para madera, pegamento para madera, hormigón, detergente y lejía . Asimismo se utilizó la vaselina sólida y agua destilada.

3.2.2. Equipos

Se utilizaron cocina eléctrica, balanza analítica, estufa, desecador, GPS y cámara fotográfica.

3.3. Tipo de investigación

Descriptivo: Debido a que implica observar y describir el comportamiento del material particulado sedimentable sin influir sobre él de ninguna manera. Los estudios descriptivos se centran en medir.

Correlacional: Porque tiene como finalidad determinar el grado de relación o asociación existente entre la concentración de material particulado sedimentable y las condiciones meteorológicas. Este tipo de investigación descriptiva busca determinar el grado de relación existente entre las variables

3.3.1. Muestra

La muestra está conformado por 07 puntos de monitoreo de material particulado sedimentable, ubicados en los distritos de Huánuco (tres puntos), Amarilis (dos puntos) y Pillco Marca (dos puntos)

3.4. Metodología

3.4.1. Determinación de material particulado sedimentable

3.4.1.1. Identificación de puntos de monitoreo

Se tomó en cuenta los criterios para la selección de sitios de monitoreo de la Dirección General de Salud Ambiental como: áreas potenciales para la localización de las estaciones de monitoreo (áreas residenciales o poblaciones susceptibles, áreas industriales o comerciales y áreas límites de ciudad); seguridad del sitio de instalación (sitios que no presenten problemas para la permanencia de los equipos, ya sea por actos vandálicos o por fenómenos de la naturaleza); consideraciones atmosféricas; topografía; datos demográficos, usos de suelo. Asimismo se consideró los requisitos mínimos para la implementación de las estaciones, como: acceso y seguridad.

3.4.1.2. Método de placas receptoras

El método de placas receptoras, consiste en la utilización de una placa (placa Petri) con un adherente como la vaselina, el cual constituye el elemento sensible del método, ya que es una sustancia adherente que permite captar el material particulado sedimentable sobre la placa. Se tomó 2 muestras por cada punto de monitoreo (07 puntos ubicados en los distritos de Huánuco, Amarilis y Pillco Marca); es decir 14 muestras para el método de placas receptoras durante 3 meses (agosto, setiembre y octubre), se obtuvieron un total de 42 muestras.

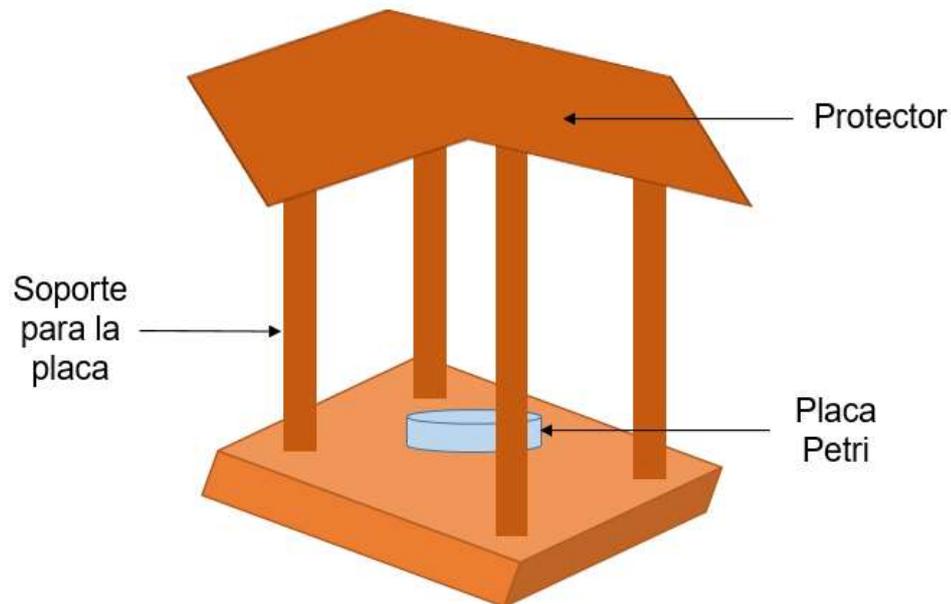


Figura 3. Esquema del equipo de monitoreo de placas receptoras.

Ubicación de equipos

Se colocaron los equipos de monitoreo en los siete puntos seleccionados, tomando en cuenta para ello las especificaciones establecidas para la colocación de los equipos de monitoreo de la calidad del aire de la Dirección General de Salud Ambiental.

Preparación de las muestras

Se realizó la limpieza de las placas (con agua y detergente), luego se procedió a fundir la vaselina para verter una película uniforme, de tal manera que ésta cubra el 70% del volumen de la placa. Posteriormente se realizó el rotulado y pesado inicial de las placas.

Se determinó el peso inicial (W inicial), usando una Balanza Analítica Digital; en donde “ W ” significa peso, ver ecuación 1.

$$W \text{ inicial} = W \text{ placa} + W \text{ vaselina} \quad (1)$$

Toma de muestras

Se colocó las placas con vaselina en los puntos de monitoreo y se dejó expuesto al ambiente durante un mes; después de cumplido el tiempo se retiró y se reemplazó con otra placa para el monitoreo del mes siguiente; las muestras recogidas se trasladaron al laboratorio de Fisicoquímica de la UNHEVAL para su posterior análisis. Durante el traslado de las muestras (preparadas y recogidas), se tuvo en cuenta las condiciones y cuidados correspondientes, por lo que se utilizó una caja de tecnopor; para evitar cualquier contacto dérmico, presión o de algún material suspendido que no corresponde al punto de muestreo; cualquier alteración del peso captado por la vaselina, alteraría totalmente los resultados de las mediciones. Para la toma de muestra, las placas se colocaron dentro de una estructura de madera diseñada para que le brinde protección del sol, hojas, aves y otros.

Análisis de las muestras

Se retiró los insectos que hayan podido quedar adheridos a la película de vaselina y que podrían alterar el resultado, posteriormente se pesaron en una balanza analítica digital las placas con las muestras obtenidas de cada punto de monitoreo.

Cálculos del material particulado sedimentable

Se determinó el peso final de la placa (placas contenidas con material particulado sedimentable) utilizando la ecuación 2.

$$W \text{ final} = W \text{ placa} + W \text{ vaselina} + WPAS \quad (2)$$

Se obtuvo el peso del material particulado sedimentable, por la diferencia de pesos, que vendría a ser el peso final (placas con vaselina contenidas con polvo) menos peso inicial de las placas (placas con vaselina), para ello se utilizó la ecuación 3.

$$W \text{ final} - W \text{ inicial} = \Delta W = WPAS \quad (3)$$

Luego, se determinó la concentración del material particulado sedimentable, para ello se utilizó la ecuación 4:

$$C = \frac{\Delta W \times 30}{\text{Área de la placa} \times \text{días de exposición}} \quad (4)$$

Donde:

W = Peso en miligramos (mg),

ΔW = Diferencia de pesos en miligramos (mg),

WPAS = Peso del Polvo Atmosférico Sedimentable,

C = Concentración de Polvo Atmosférico Sedimentable (mg/cm² /30 días),

Área de la placa = πr^2 = centímetros cuadrados (cm²),

$\pi = 3,1416$

3.4.1.3. Método de tubos pasivos

Consiste en la utilización de tubos de 30 cm de altura y 10 cm de diámetro; la parte inferior del tubo es cubierta con un tapón que contiene papel filtro y la parte superior es expuesta al exterior por donde ingresa el polvo y se sedimenta. Se tomó 2 muestras por cada punto de monitoreo; es decir 14 muestras por cada mes y durante 3 meses, se obtuvieron un total de 42 muestras.

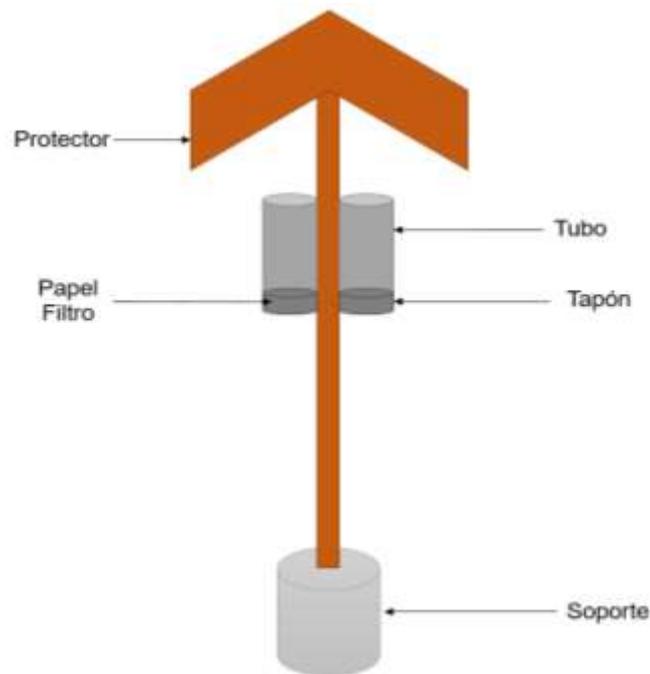


Figura 4. Esquema del equipo de monitoreo de tubos pasivos.

Ubicación de equipos

Se colocaron los equipos en los 7 puntos seleccionados, tomando en cuenta para ello las especificaciones establecidas para la colocación de los equipos de monitoreo, como una altura no menor de 1,5 m. y no mayor de 3 m.

Preparación de la muestras

Se lavó y secó los tapones, luego se pesó y rotuló. Los filtros se colocaron en la estufa a 105 ± 5 °C durante 2 horas y posteriormente en el desecador durante al menos 1 hora, luego se pesaron (peso inicial), la pesada se realizó con aproximación a la décima de miligramo, comprobando que se mantenga una pesada constante en al menos tres repeticiones; luego los filtros, se colocaron en los tapones y se cubrieron con papel de aluminio para así evitar la contaminación e introducción de polvo u otros objetos al momento de su traslado a los puntos de monitoreo.

Toma de muestras por el método de tubos pasivos

Se colocaron los equipos de muestreo en los puntos de seleccionados, se limpió con agua destilada el interior de los tubos, se colocaron los tapones con el filtro en los equipos de muestreo y se dejó al aire libre durante un mes. Una vez cumplido el tiempo de exposición se procedió a retirar los tapones a la misma hora y se trasladó al laboratorio de Bromatología para realizar el análisis respectivo. Se colocó en el mismo lugar los tapones correspondientes para el siguiente mes de muestreo y así sucesivamente hasta completar los muestreos (tres meses).

Análisis de las muestras

Se retiraron los filtros (que contenían material particulado sedimentable) de los tapones y se secaron en la estufa a 105°C, hasta alcanzar

peso constante; posteriormente se dejó en el desecador durante al menos 1 hora y luego se pesaron con una balanza analítica, anotando el peso exacto (peso final). Las paredes y la base del tapón que contenían partículas sedimentables se lavaron con agua destilada, luego se filtró el agua con papel filtro previamente pesadas (peso inicial), finalmente se pesó el filtro que contenían las partículas sedimentables (peso final).

Cálculo del Material Particulado Sedimentable

Para el determinar la concentración de material particulado sedimentable se utilizó la siguiente ecuación 5.

$$PAS = \left[\frac{\frac{mg}{cm^2}}{mes} \right] = \left(\frac{P_{final} - P_{inicial}}{\text{Área}} \right) / mes \quad (5)$$

Análisis estadístico

Se hizo un análisis de varianza (ANVA) para determinar si existen diferencias significativa entre las medias de los resultados obtenidos de la cuantificación de material particulado sedimentable (por los dos métodos de monitoreo: tubos pasivos y placas receptoras) de cada punto de monitoreo y por cada mes (agosto, setiembre y octubre), para ello se utilizó la herramienta de análisis de datos estadísticos de Excel; se consideró las estaciones (varianza entre grupos) y los meses de muestreo (varianza dentro de los grupos), en el Cuadro 8 se muestran el esquema para el análisis de varianza, con un nivel de significancia de $\alpha=0,05$.

Cuadro 8. Esquema del análisis de varianza (ANVA).

FV	GL	SC	CM	Fc	Significancia
Estaciones	6	ST-e	SC _{trat} /GL _{trat}	CM _{trat} /CM _e	F _c >F _t
Meses	14	SCT-SC _{trat}	SC _{error} /GL _e		
Total	20				

3.4.2. Comparación de los resultados de la cuantificación de material particulado sedimentable por los dos métodos

Se hizo la comparación de medias de los resultados de la concentración de material particulado sedimentable de los dos métodos de monitoreo, mediante la prueba t – Student, con un nivel de significancia de $\alpha=0,05$; para ello se utilizó la herramienta de análisis de datos estadísticos de Excel, también se determinó el coeficiente de variación, sesgo y curtosis estandarizado.

Asimismo se realizó el análisis de correlación entre los dos métodos, para determinar el grado de relación entre ambos métodos, para ello se utilizó el gráfico de dispersión de Excel y se determinó el coeficiente de correlación de Pearson. Una vez realizado el análisis de los datos,

Una vez analizados los datos, se procedió a interpretar y se plasmó en el informe final de tesis.

3.4.3. Determinación de los puntos de mayor contaminación por material particulado sedimentable

De acuerdo a los resultados obtenidos del monitoreo de material particulado sedimentable, se procedió determinar los puntos de mayor contaminación por material particulado sedimentable para ambos métodos de monitoreo (tubos pasivos y placas receptoras), para ello se utilizó el gráfico de barras de Excel, comparando la concentración de material particulado sedimentable de todos los puntos de monitoreo con el valor límite máximo permitido, establecido por la Organización Mundial de la Salud ($0,5 \text{ mg/cm}^2/30\text{días}$).

3.4.4. Influencia de los factores meteorológicos en la concentración de material particulado sedimentable

Para determinar la influencia de los factores meteorológicos (precipitación, temperatura y velocidad del viento) en la concentración de material particulado sedimentable, se hizo un análisis de correlación entre las variables meteorológicas con la concentración de material particulado sedimentable, para ello se utilizó la herramienta de gráfico de dispersión y de análisis de datos estadísticos de Excel. Asimismo se hizo un análisis de correlación en donde se determinó el coeficiente de correlación de Pearson, para saber el grado de correlación existente entre las variables y la covarianza para determinar la existencia de una relación lineal entre las dos variables y si hay dependencia inversa o negativa.

3.5. Variables

3.5.1. Variable dependiente

- Concentración de material particulado sedimentable (mg/cm²/30días).

3.5.2. Variable independiente

- Precipitación
- Temperatura
- Velocidad del viento

IV. RESULTADOS

4.1. Cuantificación del material particulado sedimentable

4.1.1. Mes de agosto

Haciendo un análisis de los datos obtenidos del muestreo de material particulado sedimentable en la zona urbana de Huánuco (Distritos de Huánuco, Amarilis y Pillco Marca), en el Cuadro 9 se presentan los resultados promedio de material particulado sedimentable, por el método de tubos pasivos y placas receptoras de los 7 puntos de monitoreo seleccionados, donde se observan valores claramente diferenciados de la concentración de material particulado sedimentable entre los puntos de monitoreo y por cada método de monitoreo; presentando así mayor concentración de material particulado sedimentable el punto 4 en ambos métodos, con valores de 10,4546 mg/cm²/30días para el método de tubos pasivos y 17,6166 mg/cm²/30días para el método de placas receptoras

Asimismo se observa que el punto de monitoreo de menor concentración de material particulado sedimentable para ambos métodos (tubos pasivos y placas receptoras) es el punto 1, con valores de 4,4806 mg/cm²/30días para el método de tubos pasivos y 10,1664 mg/cm²/30días para el método de placas receptoras.

Cuadro 9. Concentración de material particulado sedimentable del mes de agosto.

Puntos de Monitoreo	Tubos Pasivos (mg/cm ² /30días)	Placas Receptoras (mg/cm ² /30días)
Punto 1	4,4806	10,1664
Punto 2	9,6433	15,5918
Punto 3	5,0748	11,9366
Punto 4	10,4546	17,6166
Punto 5	6,2980	13,4344
Punto 6	4,9747	11,3937
Punto 7	5,1475	13,1143

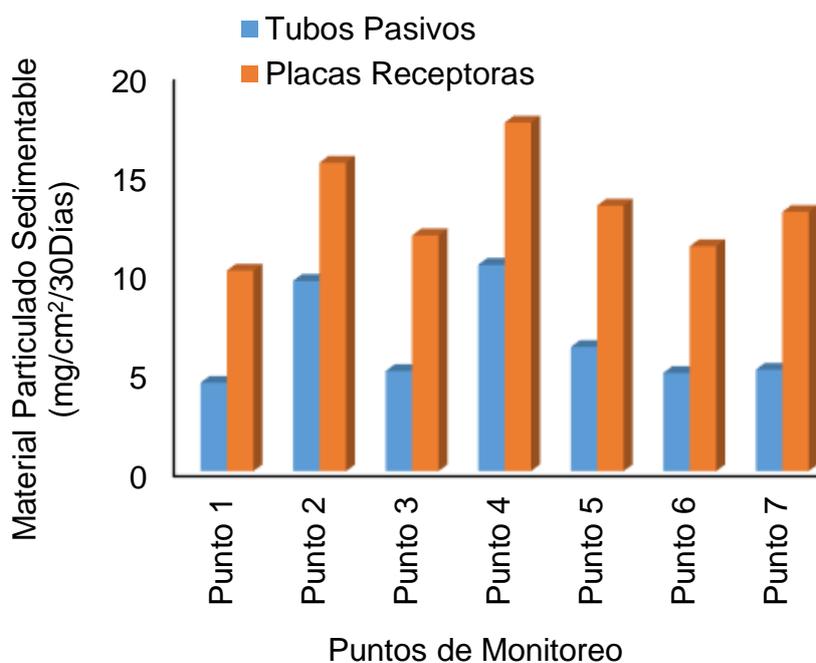


Figura 5. Concentración de material particulado sedimentable del mes de agosto.

El punto 4 presentan mayor concentración de material particulado sedimentable y el punto 1 menor concentración para los métodos de tubos pasivos y placas receptoras (Figura 5).

4.1.2. Mes de setiembre

Los puntos de monitoreo 6 y 2 presentan mayor concentración de material particulado sedimentable con valores de 6,2373 y 14,2726 mg/cm²/30días (método de tubos pasivos y placas receptoras respectivamente), asimismo los puntos 1 y 4 presentar de menor concentración con valores de 4,6958 y 10,1222 mg/cm²/30días para el método de tubos pasivos y placas receptoras respectivamente (Cuadro 10).

Cuadro 10. Concentración de material particulado sedimentable del mes de setiembre

Puntos de Monitoreo	Tubos Pasivos (mg/cm ² /30días)	Placas Receptoras (mg/cm ² /30días)
Punto 1	4,6958	12,2991
Punto 2	5,6129	14,2726
Punto 3	4.9262	11,6360
Punto 4	5,4158	10,1222
Punto 5	5,7523	11,9667
Punto 6	6,2373	12,8650
Punto 7	4,7701	10,8932

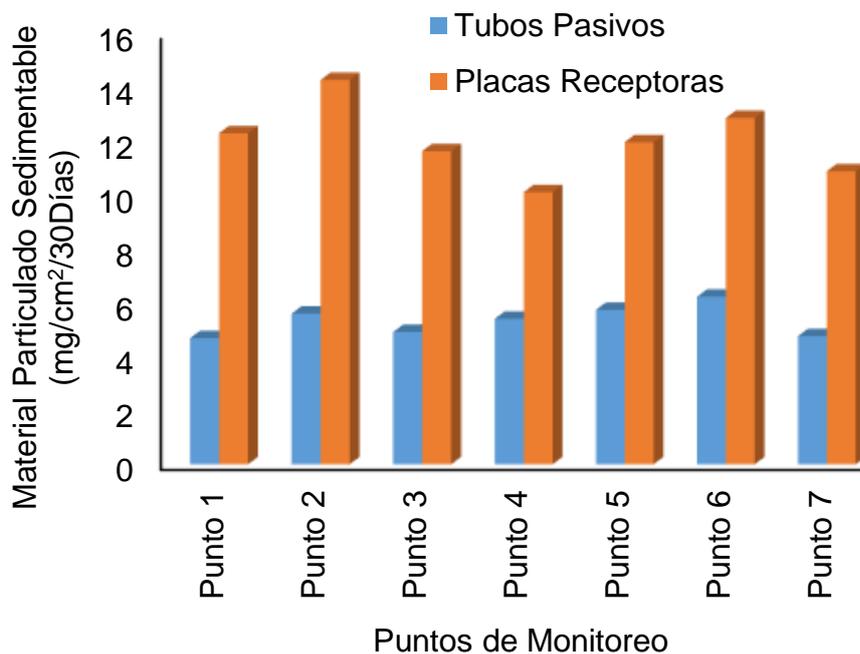


Figura 6. Concentración de material particulado sedimentable por los dos métodos, correspondientes al mes de setiembre.

En la Figura 6 se presenta el gráfico de columnas que muestra la concentración de material particulado sedimentable de los dos métodos (tubos pasivos y placas receptoras), correspondientes al mes de setiembre; donde se observa que los puntos de monitoreo 6 y 2 presentan mayor concentración de material particulado sedimentable por el método de tubos pasivos y placas receptoras.

Asimismo se puede observar que la menor concentración de material particulado sedimentable se encuentra en los puntos de monitoreo 1 y 4 para los métodos de tubos pasivos y placas receptoras respectivamente. También se observa que el método de placas receptoras presenta mayor concentración de material particulado sedimentable en todos los puntos.

4.1.3. Mes de octubre

En el Cuadro 11 se muestran los resultados obtenidos del monitoreo de material particulado sedimentable por los dos métodos (tubos pasivos y placas receptoras), correspondientes al mes de octubre; observándose mayor concentración para ambos métodos en el punto 2, con valores de 4,1714 y 12,5343 mg/cm²/30días para el método de tubos pasivos y placas receptoras respectivamente; y menor concentración en los puntos de monitoreo 1 y 6 con valores de 0,9201 mg/cm²/30días para el método de tubos pasivos y 6,3379 mg/cm²/30días para el método de placas receptoras. Asimismo se observan valores muy diferenciados entre los dos métodos.

Cuadro 11. Concentración de material particulado sedimentable del mes de octubre.

Puntos de Monitoreo	Tubos Pasivos (mg/cm ² /30días)	Placas Receptoras (mg/cm ² /30días)
Punto 1	0,9201	6,9480
Punto 2	4,1714	12,5343
Punto 3	2,5025	9,2133
Punto 4	3,4847	11,1532
Punto 5	3,8576	8,8720
Punto 6	2,6420	6,3379
Punto 7	3,7773	8,8119

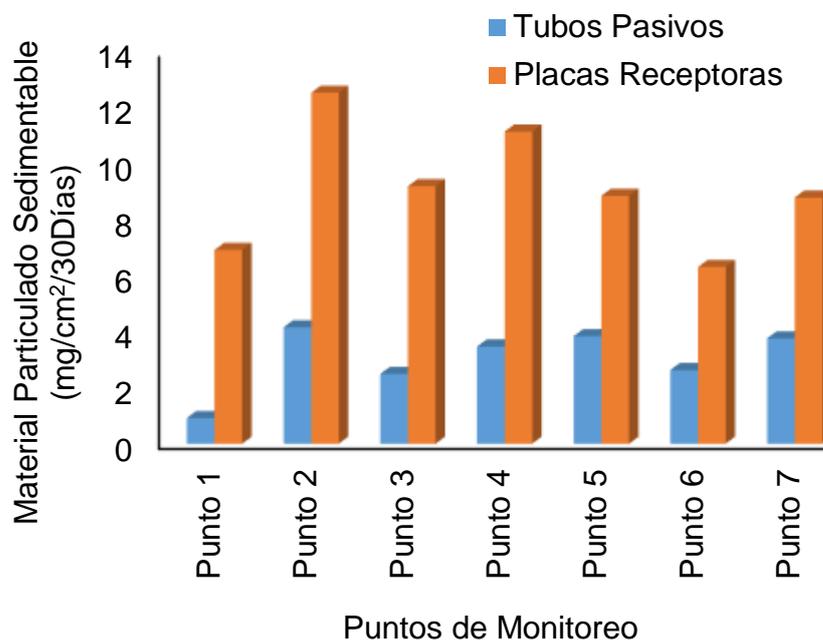


Figura 7. Concentración de material particulado sedimentable por los dos métodos, correspondientes al mes de octubre.

En la Figura 7 se presenta la concentración de material particulado sedimentable por los dos métodos, donde el punto 2 presenta mayor concentración de material particulado en ambos métodos (tubos pasivos y placas receptoras) y los puntos 1 y 6 presentan menor concentración, para el método de tubos pasivos y placas receptoras respectivamente. También se observa que el método de placas receptoras presenta mayor concentración de material particulado sedimentable en todos los puntos.

En el Cuadro 12 se muestran las concentraciones promedio del material particulado sedimentable por puntos de monitoreo (7 puntos) y meses (agosto, setiembre y octubre) para los métodos de tubos pasivos y placas receptoras respectivamente.

Cuadro 12. Concentración promedio por punto y mes de monitoreo material particulado sedimentable ($\text{mg}/\text{cm}^2/30\text{días}$) para ambos métodos.

Método de Monitoreo	Puntos de monitoreo	Meses			
		Agosto	Setiembre	Octubre	Promedio
Tubos Pasivos	1	4,4806	4,6958	0,9201	3,3655
	2	9,6433	5,6129	4,1714	6,4758
	3	5,0748	4,9262	2,5025	4,1678
	4	10,4546	5,4158	3,4847	6,4517
	5	6,2980	5,7523	3,8576	5,3026
	6	4,9747	6,2373	2,6420	4,6180
	7	5,1475	4,7701	3,7773	4,5650
	Promedio	6,5819	5,3443	3,0508	4.9924
Placas Receptoras	1	10,1664	12,2991	6,9480	9,8045
	2	15,5918	14,2726	12,5343	14,1329
	3	11,9366	11,6360	9,2133	10,9286
	4	17,6166	10,1222	11,1532	12,9640
	5	13,4344	11,9667	8,8720	11,4244
	6	11,3937	12,8650	6,3379	10,1989
	7	13,1143	10,8932	8,8119	10,9398
	Promedio	13,3220	12,0078	9,1244	11.4847

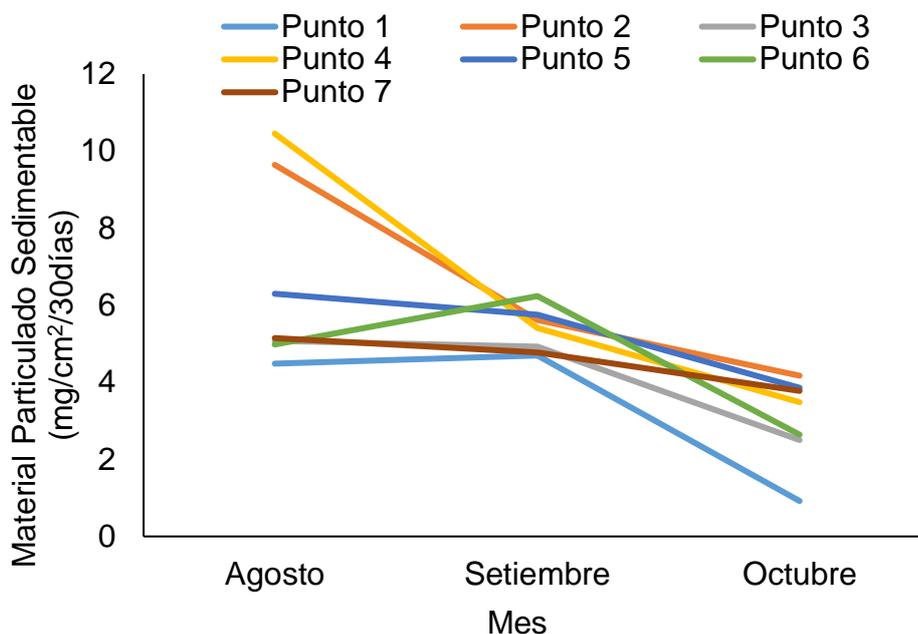


Figura 8. Concentración promedio de material particulado sedimentable por meses, por el método de tubos pasivos.

Mediante el gráfico de líneas de la Figura 8, donde se muestra la tendencia de la concentración de material particulado sedimentable en los meses de monitoreo (agosto, setiembre y octubre), se puede observar que las concentraciones de material particulado sedimentable en los puntos de monitoreo 2, 3, 4, 5 y 7; tienen la misma tendencia, presentando mayor concentración promedio de material particulado sedimentable en el mes de agosto y menor concentración promedio en el mes de octubre.

También se observa que los puntos de monitoreo 1 y 6 tienen diferente comportamiento a los demás puntos, presentando mayor concentración promedio de material particulado sedimentable en el mes de setiembre; y menor concentración promedio en el mes de octubre.

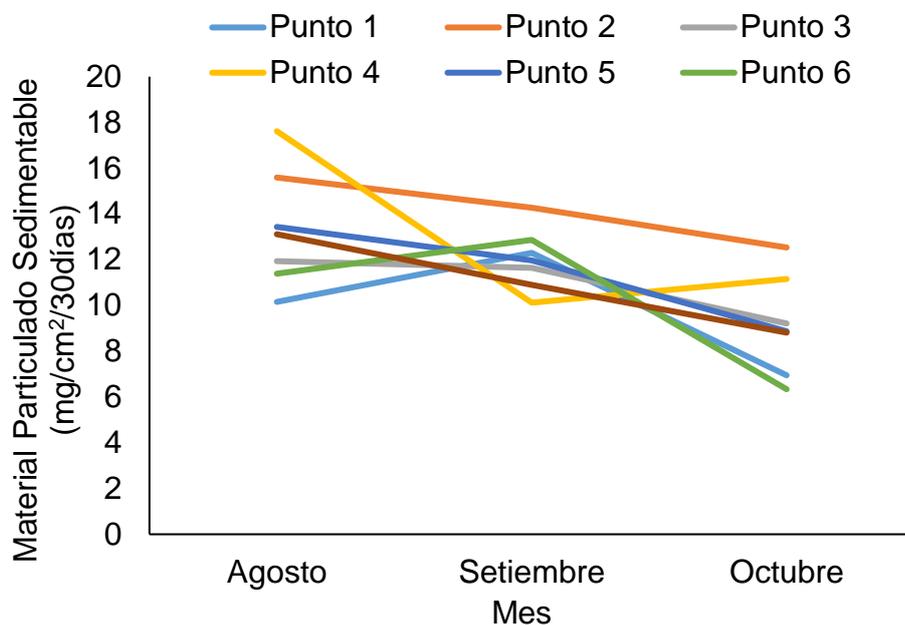


Figura 9. Concentración promedio de las muestras de material particulado sedimentable por meses, método de placas receptoras.

Las concentraciones promedio de material particulado sedimentable por el método de placas receptoras se muestran en el gráfico de líneas presentado en la Figura 9, donde se observa que los puntos de monitoreo 2, 3, 4, 5 y 7 tienen similar comportamiento en función de los meses, presentando mayor concentración de material particulado sedimentable en el mes de agosto y menor concentración en el mes de octubre.

También se observa que los puntos de monitoreo 1 y 6 tienen diferente comportamiento a los demás puntos, presentando mayor concentración de material particulado sedimentable en el mes de setiembre; y menor concentración de material particulado en el mes de octubre a excepción del punto de monitoreo 4 que presenta menor concentración en el mes de setiembre.

4.1.4. Por distritos

Haciendo un análisis de los resultados por distritos, obtenidos del monitoreo de material particulado sedimentable en los puntos seleccionados, se presenta el Cuadro 13, que muestra los valores promedios de la concentración de material particulado sedimentable por distritos y meses de monitoreo, de acuerdo a los valores presentados, el distrito con mayor concentración de material particulado sedimentable es Huánuco y el de menor concentración es el distrito de Pillco Marca.

Cuadro 13. Concentración de material particulado sedimentable por distrito (mg/cm²/mes).

Método de Monitoreo	Distrito	Mes			
		Agosto	Setiembre	Octubre	Promedio
Tubos Pasivos	Pillco Marca	4,7277	5,4666	1,7810	3,9918
	Huánuco	8,3909	5,3183	3,3862	5,6985
	Amarilis	5,7227	5,2612	3,8174	4,9338
	Promedio	6,2804	5,3487	2,9949	
Placas Receptoras	Pillco Marca	10,7801	12,5821	6,6429	10,0017
	Huánuco	15,0483	12,0103	10,9669	12,6752
	Amarilis	13,2744	11,4300	8,8419	11,1821
	Promedio	13,0343	12,0074	8,8173	

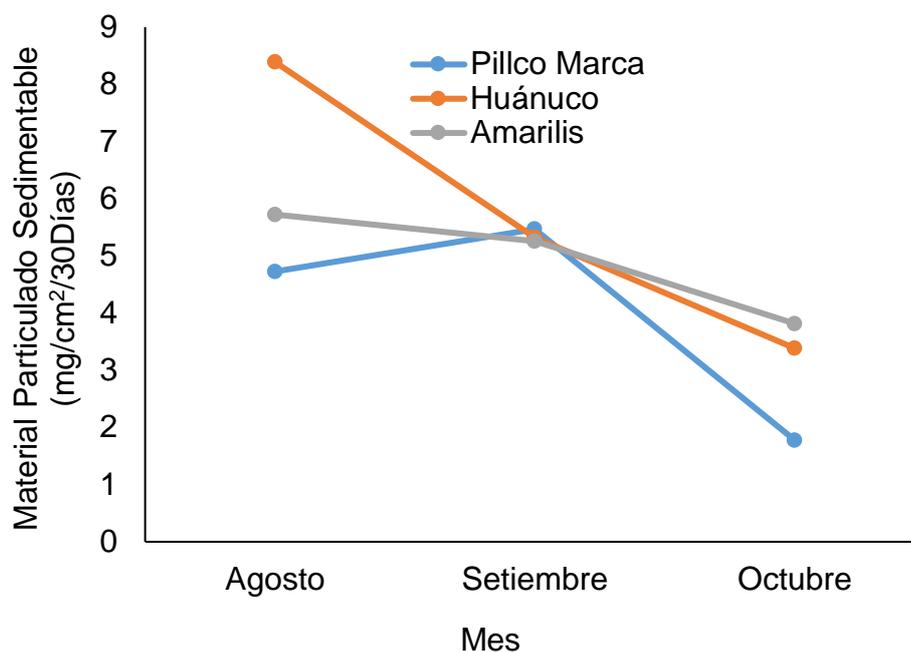


Figura 10. Concentración de material particulado sedimentable por distritos, método de tubos pasivos.

De acuerdo al gráfico de líneas donde se muestra la tendencia de la concentración promedio de material particulado sedimentable (promedio por distritos: Huánuco, Amarilis y Pillco Marca) en el tiempo (meses de monitoreo), del método de tubos pasivos; se puede observar que los distritos de Huánuco y Amarilis tienen igual comportamiento en función de los meses de monitoreo, presentando mayor concentración de material particulado sedimentable en el mes de agosto y menor concentración en el mes de octubre (Figura 10)..

También se puede observar que a diferencia de los distritos de Huánuco y Amarilis, el distrito de Pillco Marca presenta mayor concentración de material particulado sedimentable en el mes de setiembre y menor concentración en el mes de octubre (Figura 10).

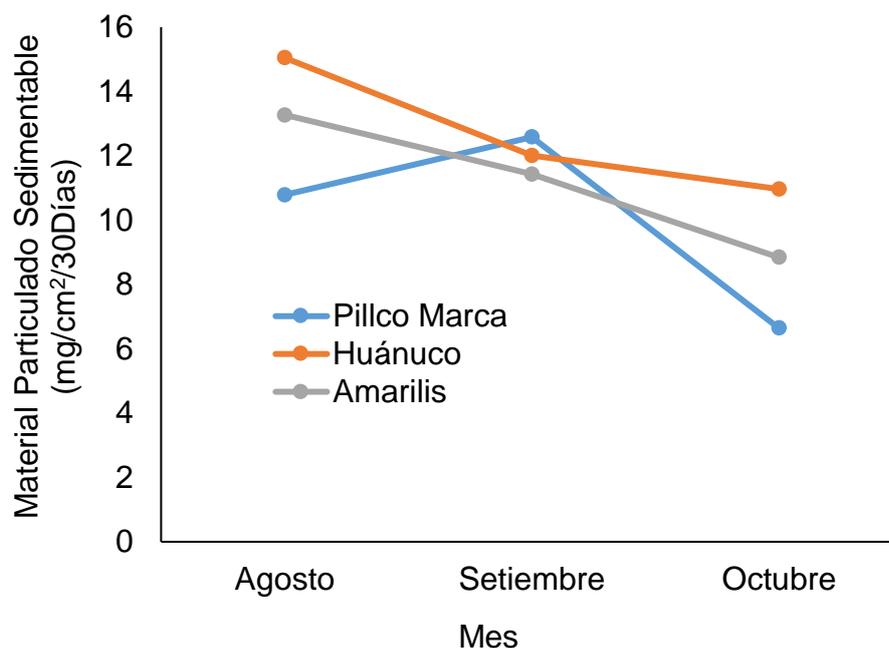


Figura 11. Concentración de material particulado sedimentable por distritos, método de placas receptoras.

De acuerdo al gráfico de líneas que se muestra en la Figura 11, donde se presenta la tendencia de la concentración promedio de material particulado sedimentable (promedio por distritos: Huánuco, Amarilis y Pillco Marca) en el tiempo (meses de monitoreo: agosto, setiembre y octubre), del método de tubos pasivos, se observa que los distritos de Huánuco y Amarilis tienen igual comportamiento en función de los meses de monitoreo, presentando mayor concentración de material particulado sedimentable en el mes de agosto y menor concentración en el mes de octubre; también se puede observar que a diferencia de los distritos de Huánuco y Amarilis, el distrito de Pillco Marca presenta mayor concentración de material particulado sedimentable en el mes de setiembre y menor concentración en el mes de octubre.

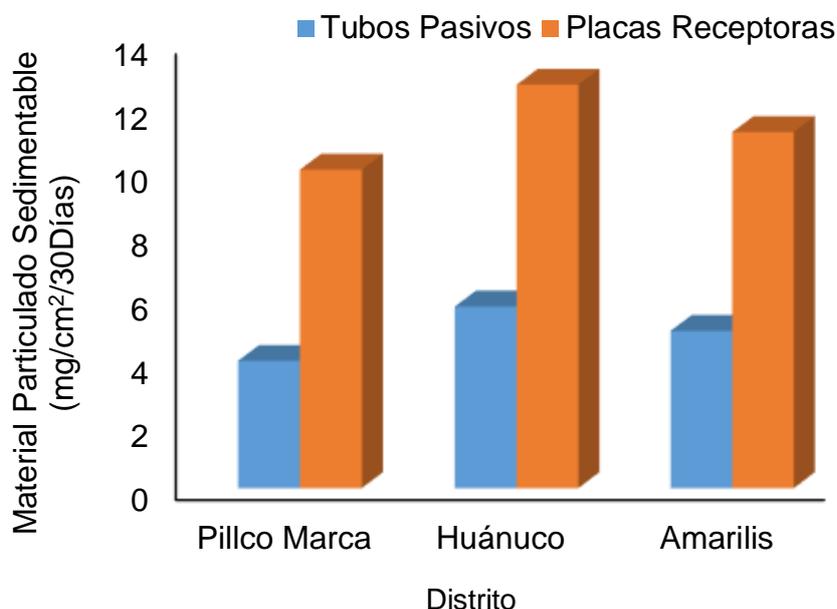


Figura 12. Concentración promedio por distrito de material particulado sedimentable, para ambos métodos.

En la Figura 12 se hace una comparación de los resultados promedio de los dos métodos (tubos pasivos y placas receptoras) por distritos, donde se observa que el distrito de Huánuco presenta mayor concentración de material particulado sedimentable y el distrito de Pillco marca menor concentración en ambos métodos. Asimismo se observa el método de placas receptoras presenta mayor concentración de material particulado sedimentable en todos los puntos.

Haciendo un análisis de varianza (ANVA) de las medias de la concentración de material particulado sedimentable de los puntos de monitoreo para el método de tubos pasivos (Cuadro 16 del Anexo A) y placas receptoras (Cuadro 17 del Anexo A), nos muestra que no existen diferencias significativas entre las medias de los puntos de monitoreo.

4.2. Comparación de los resultados de los dos métodos

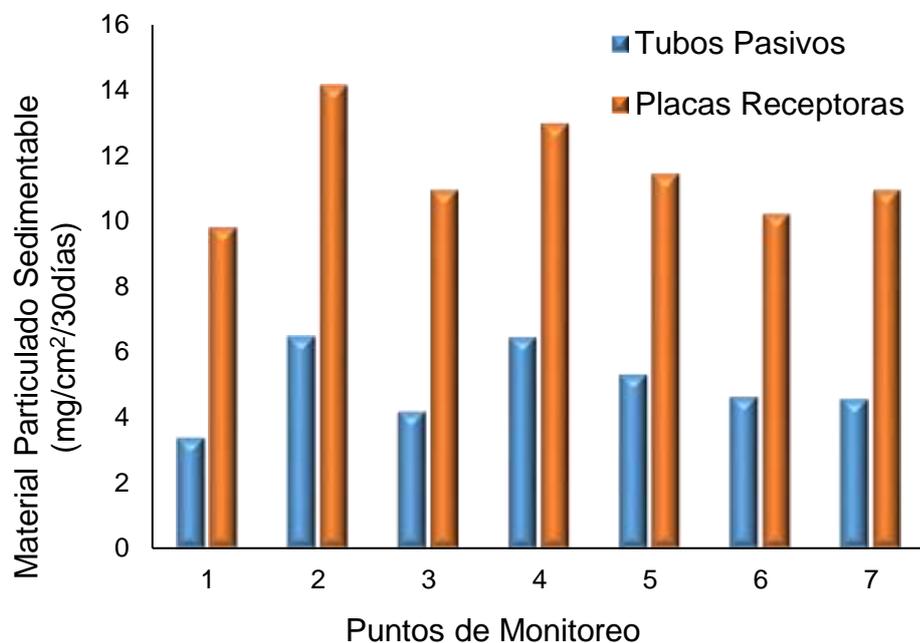


Figura 13. Concentración promedio de material particulado sedimentable, por puntos de monitoreo.

En la Figura 13 se muestran las concentraciones promedio de material particulado sedimentable, por puntos de monitoreo; donde se observa que la concentración de material particulado sedimentable por el método de placas receptoras es mayor que la concentración por el método de tubos pasivos, en todos los puntos de monitoreo.

En la prueba t-Student para muestras independientes (Cuadro 18 del Anexo A) se tiene un p-valor de 0,0000 inferior al nivel de significancia de 0,05 por lo que existen diferencias significativas en la cuantificación de material particulado sedimentable por los dos métodos de monitoreo.

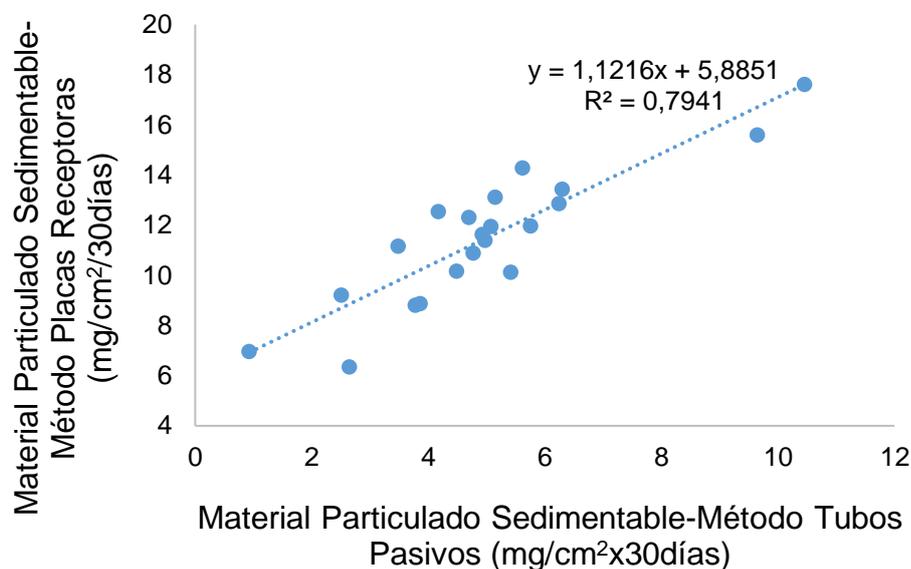


Figura 14. Gráfico de regresión comparando la cuantificación de material particulado sedimentable por los dos métodos.

En la Figura 14 muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre los métodos de placas receptoras y tubos pasivos. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 79,41% de la variabilidad en el método de placas receptoras. El coeficiente de correlación es igual a 0,89 (Cuadro 20 del Anexo A), indicando una relación moderadamente fuerte entre las concentraciones de material particulado sedimentable de los dos métodos.

En el resumen estadístico para las dos muestras de datos (Cuadro 20 del Anexo A), se observa que ambos valores de sesgo estandarizado se encuentran dentro del rango esperado y el método de tubos pasivos tiene una curtosis estandarizada fuera del rango normal.

4.3. Puntos de mayor contaminación por material particulado sedimentable

En el Cuadro 14 se presentan las concentraciones promedio del material particulado sedimentable por puntos de monitoreo y el límite máximo permisible establecido por la OMS (0,5 mg/cm²/30días), donde se observa que el punto 2 presenta mayor concentración de material particulado sedimentable y el punto 1 menor concentración en ambos métodos.

Asimismo las concentraciones de material particulado sedimentable en todos los puntos, superan el límite máximo permisible establecido por la OMS.

Cuadro 14. Concentración promedio de material particulado sedimentable y el límite máximo permisible establecido por la OMS.

Puntos de Monitoreo	Tubos Pasivos (mg/cm ² /30días)	Placas Receptoras (mg/cm ² /30días)	Límite Máximo Permisible (OMS)
1	3,3655	9,8045	
2	6,4758	14,1329	
3	4,1678	10,9286	
4	6,4517	12,9640	0,5
5	5,3026	11,4244	
6	4,6180	10,1989	
7	4,5650	10,9398	

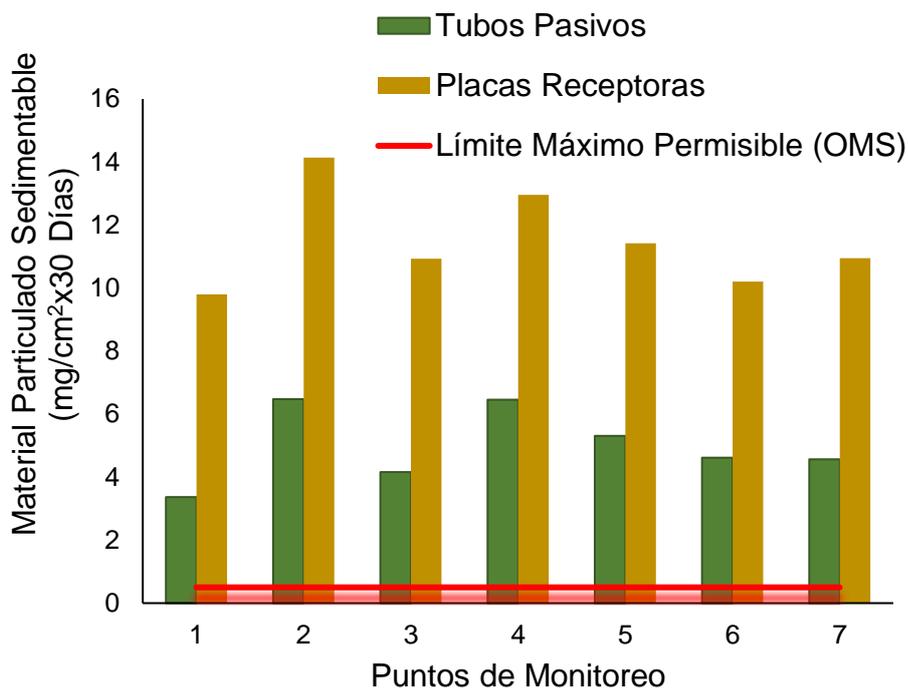


Figura 15. Concentración promedio del material particulado sedimentable vs Límite Máximo Permissible.

De acuerdo al gráfico de barras (Figura 15), se muestran las concentraciones promedio de material particulado sedimentable de cada punto de monitoreo, que son comparados con el Límite Máximo Permissible establecido para material particulado sedimentable por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 0,5 mg/cm²/30días, donde que las concentraciones promedio de material particulado sedimentable de cada punto de monitoreo de ambos métodos están por encima o superan el límite máximo permisible establecido por la Organización Mundial de la Salud.

Asimismo el punto 2 presenta mayor concentración de material particulado sedimentable y el punto 1 menor concentración en ambos métodos.

4.4. Influencia de los factores meteorológicos en la concentración del material particulado sedimentable

En el Cuadro 15 se muestran las concentraciones promedio del material particulado sedimentable y los datos promedios mensuales de los factores meteorológicos como la precipitación, la temperatura y velocidad del viento (datos obtenidos de la estación meteorológica de Huánuco).

Asimismo de acuerdo a los datos obtenidos de la Estación meteorológica de Huánuco, los vientos predominantes para los meses de monitoreo fueron de norte y noreste (Figura 48 en Anexo E).

Cuadro 15. Concentración de material particulado sedimentable y parámetros meteorológicos.

Mes	Material Particulado		Parámetros Meteorológicos		
	Sedimentable		Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Velocidad del Viento (m/s)
	Tubos Pasivos	Placas Receptoras			
Agosto	6,5819	13,3220	1,10	20,61	6,48
Setiembre	5,3443	12,0078	1,70	20,94	6,61
Octubre	3,0508	9,1244	21,40	21,80	6,80

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados de monitoreo de material particulado sedimentable y datos meteorológicos del SENAMHI.

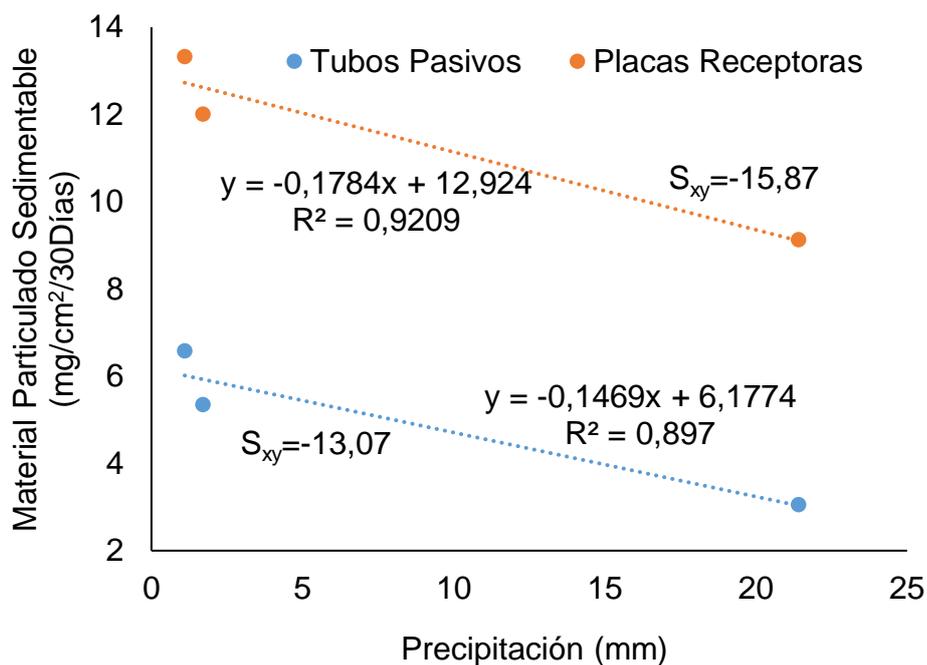


Figura 16. Correlación entre la concentración de material particulado sedimentable y la precipitación.

Haciendo un análisis de correlación entre la concentración de material particulado sedimentable y la precipitación, que se muestra en el gráfico de dispersión de la Figura 16, se observa que existe una correlación negativa fuerte entre la concentración de material particulado sedimentable y la precipitación en ambos métodos de monitoreo, teniendo un coeficiente de correlación de $-0,9960$ para el método de tubos pasivos y $-0,9420$ para el método de placas receptoras (Cuadro 21 del Anexo A).

Asimismo dado a que la covarianza (S_{xy}) es menor que cero, indica que hay dependencia inversa o negativa, es decir, a grandes valores de precipitación corresponde pequeños valores de la concentración de material particulado sedimentable.

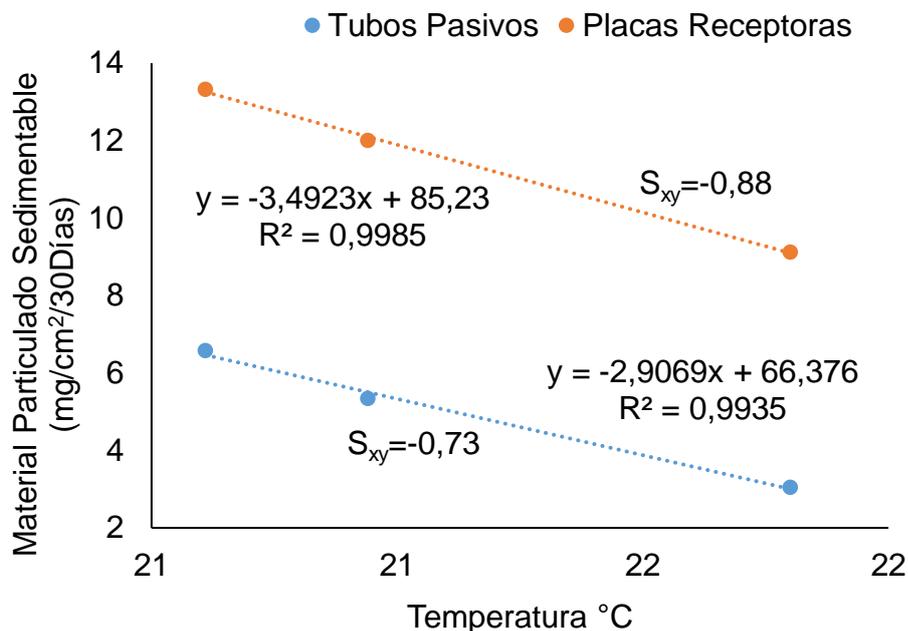


Figura 17. Correlación entre la concentración de material particulado sedimentable y la temperatura.

Haciendo un análisis de correlación entre la concentración de material particulado sedimentable y la temperatura, que se muestra en el gráfico de dispersión de la Figura 17, se observa que existe una correlación negativa fuerte entre la concentración de material particulado sedimentable y la precipitación en ambos métodos de monitoreo, teniendo un coeficiente de correlación de -0,9877 para el método de tubos pasivos y -0,9954 para el método de placas receptoras (Cuadro 21 del Anexo A).

Asimismo dado a que la covarianza (S_{xy}) es menor que cero, indica que hay dependencia inversa o negativa, es decir, a grandes valores de precipitación corresponde pequeños valores de la concentración de material particulado sedimentable.

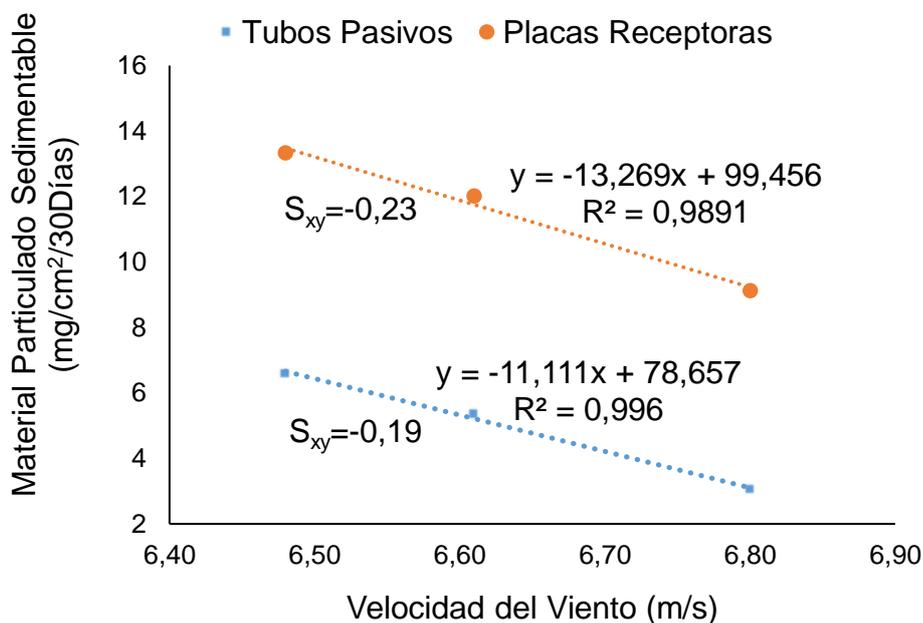


Figura 18. Correlación entre la concentración de material particulado sedimentable y la velocidad del viento.

Haciendo un análisis de correlación entre la concentración de material particulado sedimentable y la velocidad del viento, que se muestra en el gráfico de dispersión de la Figura 18, se observa que existe una correlación negativa fuerte entre la concentración de material particulado sedimentable y la precipitación en ambos métodos de monitoreo, teniendo un coeficiente de correlación de -0,9551 para el método de tubos pasivos y -0,9989 para el método de placas receptoras (Cuadro 21 del Anexo A).

Asimismo dado a que la covarianza (S_{xy}) es menor que cero, indica que hay dependencia inversa o negativa, es decir, a grandes valores de precipitación corresponde pequeños valores de la concentración de material particulado sedimentable.

V. DISCUSIÓN

Según MARCOS y VALDERRAMA (2012), la OMS establece el límite máximo permisible para material particulado sedimentable de 0,5 mg/cm²/30días. En la zona urbana de Huánuco, la concentración de material particulado sedimentable supera los límites máximos permisibles, tal es el caso del distrito de Huánuco que supera en un 5,1985 y 12,1752 mg/cm²/30días, el distrito de Pillco Marca que supera en un 3,4918 y 9,5017 mg/cm²/30días y el distrito de Amarilis que supera en un 4,4338 y 10,6821 mg/cm²/30días para el método de tubos pasivos y placas receptoras respectivamente.

Entre las técnicas empleadas para la recolección de muestras de material particulado sedimentable se encuentran el muestreo con colectores y el en superficies adhesivas. A pesar de que se efectúan mediante análisis gravimétricos, existen grandes diferencias en los resultados obtenidos por los diferentes métodos de muestreo, por esta razón las mediciones de polvo sedimentable son relativas al dispositivo empleado (CORLETO y CORTEZ, 2012). En las muestras colectadas se observa que las concentraciones por el método de placas receptoras son mayores a las concentraciones por el método de tubos pasivos, existiendo diferencias significativas entre las dos medias.

Como principales fuentes de generación de Partículas Sedimentables, son el transporte Urbano, calles sin pavimentar, acumulación y

quema de residuos sólidos, desarrollo de actividades económicas, principalmente las dedicadas a la fabricación y comercialización de productos (LOZANO, 2012); en los resultados obtenidos por ambos métodos, se observa que la Urbanización Predio el Tingo presenta mayor concentración de material particulado sedimentable con valores de 6,4758 y 14,1329 mg/cm²/30días para los métodos de tubos pasivos y placas receptoras respectivamente, esto se debe a la presencia de calles no pavimentadas, transporte urbano, expansión urbana, remoción de tierra para la construcción de viviendas, actividades como elaboración de adobes y chancadora de piedras, etc.

Las grandes ciudades rodeadas de una topografía compleja como, valles o cadenas montañosas a menudo experimentan altas concentraciones de contaminantes del aire (CARRANZA, 2004). La ciudad de Huánuco se encuentra en medio de cadenas montañosas, es por ello que la concentración de material particulado sedimentable es alta en comparación con los límites máximos permisibles establecidos por la OMS.

Según el SENAMHI, 2016 el punto de mayor concentración de Material Particulado Sedimentable se encuentra en el distrito de Amarilis y el de menor concentración en Huánuco, mientras que en este trabajo de investigación el punto de mayor concentración (Urb. Predio el Tingo) se encuentra en el distrito de Huánuco y el de menor concentración (AA.HH. Arcoragra) en el distrito de Pillco Marca; esta diferencia se debe a que los puntos de monitoreo están ubicados en diferentes zonas. Asimismo se tiene que la concentración promedio por mes es de 2,4640 mg/cm²/30días (Agosto); 2,2444 mg/cm²/30días

(Setiembre) y 2,034 mg/cm²/30días (Octubre), presentando igual comportamiento que las muestras obtenidas en esta investigación con valores de 13,3220 mg/cm²/30días (Agosto); 12,0078 mg/cm²/30días (Setiembre) y 9,1244 mg/cm²/30días (Octubre); es decir que disminuyen a medida que los parámetros meteorológicos aumentan.

La precipitación permite que los contaminantes sean retirados o lavados de la atmósfera por la lluvia, en estas épocas lluviosas existe mayor humedad relativa, disminuyendo la acumulación de los contaminantes y reduciendo así la contaminación atmosférica (BARRIOS, 2007). En el Cuadro 15 se observa que a medida que aumenta la precipitación la concentración de material particulado sedimentable disminuye, asimismo al determinar el coeficiente de correlación de Pearson de -0,9960 y -0,9420 para el método de tubos pasivos y placas receptoras respectivamente, nos indican que existe una fuerte correlación negativa entre la concentración de material particulado y la precipitación.

La temperatura determinan los movimientos de las masas de aire y, por lo tanto, las condiciones de estabilidad o inestabilidad atmosféricas. Asimismo, estas variaciones verticales de temperatura pueden dar lugar a situaciones de inversión térmica, lo que dificulta la dispersión de la contaminación. Las altas temperaturas favorecen la dispersión y disminuyen la concentración de los contaminantes en la atmósfera (BARRIOS, 2007). Es por ello que en el Cuadro 15 se observa que a medida que aumenta la temperatura la concentración de material particulado sedimentable disminuye, asimismo al

determinar el coeficiente de correlación de Pearson de $-0,9877$ y $-0,9954$ para el método de tubos pasivos y placas receptoras respectivamente, nos indican que existe una fuerte correlación negativa entre la concentración de material particulado y la temperatura.

La velocidad del viento afecta en gran medida la concentración de contaminantes en un área, mientras mayor sea, menor será la concentración (MOREANO, 2012), en el Cuadro 15 se observa que la velocidad de viento aumenta cada mes, es por ello que la concentración de material particulado disminuye. Asimismo se tiene el coeficiente de correlación de Pearson de $-0,9551$ y $-0,9989$ para el método de tubos pasivos y placas receptoras respectivamente, que indica que existe una fuerte correlación negativa entre la velocidad del viento y la concentración de material particulado sedimentable.

VI. CONCLUSIÓN

1. La concentración promedio de material particulado sedimentable es de 4,9924 mg/cm²x30días (método de tubos pasivos) y 11,4847mg/cm²x30días (método de placas receptoras), superando el Límite Máximo Permisible, establecido por la OMS de 0,5 mg/cm²x30días.
2. El método de placas receptoras presenta mayor concentración de material particulado sedimentable que el método de tubos pasivos, por lo que no pueden aplicarse indistintamente, puesto que los resultados obtenidos con la aplicación de cada uno de ellos son diferentes.
3. El punto de mayor contaminación por material particulado sedimentable es la Urbanización Predio el Tingo y el de menor contaminación es el Asentamiento Humano Arcoragra.
4. La precipitación, la temperatura y la velocidad del viento influyen en la concentración de material particulado sedimentable, a medida que éstos aumentan la concentración de material particulado sedimentable disminuye.

VII. RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios de caracterización fisicoquímica del material particulado sedimentable de la zona urbana de Huánuco.
2. Que el Gobiernos Locales incrementen los entornos ecológicos con áreas verdes como la forestación de los cerros y arborización de las calles y avenidas.
3. Tomando como referencia este trabajo y los datos de SENAMHI sobre material particulado sedimentable, se recomienda desarrollar un plan de acción para la mejora de la calidad del aire en la zona urbana de Huánuco.
4. Se debe tener cuidado en maniobrar los filtros después del mes de tomada la muestra, si se encontrase hojas secas de vegetales, insectos, etc. que afecten al estudio en el filtro, se tendrá que sacar con cuidado con una pinza y luego realizar el respectivo pesado de la muestra.
5. Para el monitoreo de Material Particulado Sedimentable, se recomienda utilizar el método de Placas Receptoras, ya que nos dan resultados más representativos del área de estudio.

VIII. ABSTRACT

CONTAMINATION OF AIR FOR SEDIMENTABLE PARTICULATE MATTER IN THE URBAN AREA OF HUANUCO FROM AUGUST TO OCTOBER OF 2016

In the city of Huanuco, a large quantity of sedimentable particulate matter can be observed, this is due to the large number of vehicles that circulate daily, the population growth and natural factors such as the geography, the velocity and the direction of the wind; for this reason, the study was done with the objective of determining the degree of air contamination, due to sedimentable particulate matter, using the passive tube and receptor plaque methods. Seven monitoring points were established; distributed in the districts of Huanuco, Amarilis and Pillco Marca. The obtained results indicate that all of the monitoring points pass the maximum allowable limit, as established by the World Health Organization. The average concentration of sedimentable particulate matter is 4,9924 and 11,4847 mg/cm²/30days, for the passive tube and receptor plaque methods, respectively; likewise, the point of greatest concentration is the Predio el Tingo housing development and that with the least concentration is the Arcoragra settlement. In applying the t-Student test, a significant difference in the quantification of sedimentable particulate matter was obtained by the two methods, with the plaque receptor method having the greatest precision; making it more recommendable to use this method. Likewise, it was determined that the meteorological parameters such as the precipitation, temperature and wind speed have a negative correlation with the concentration of sedimentable particulate material.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AGUEDO, A. 2008. Problemática Medioambiental de las Canteras de Materiales de Construcción en Lima. Tesis Maestro en Ciencias Mención en Minería y Medio Ambiente. Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. 142p.

ALDABE, J. 2011. Caracterización Físico-Química del Material Particulado en la Comunidad Foral de Navarra. Tesis Doctor en Ciencias. Pamplona, España. Universidad de Navarra. 306p.

ALVARADO, G. 2010. Estudio Integrado de Factores Que Influyen Sobre La Contaminación Atmosférica por Material Particulado Respirable de Pudahuel. Tesis Magister en Gestión y Planificación Ambiental. Santiago, Chile. Universidad de Chile. 101p.

BARRIOS, O. 2007. Contaminación del Ambiente por Material Particulado Generado en las Obras Civiles. Tesis Ing. Civil. Sincelejo, Sucre. Universidad de Sucre. 87p.

BLASER, M. 2000. Dispersión de la Contaminación Atmosférica Causada por el Tráfico Vehicular. San Salvador, Guatemala. Ed. por: B. Rosendo Majano. 99p.

BORRÁS, E. 2013. Caracterización de Material Particulado Atmosférico Generado en Reactores Fotoquímicos y Procedente de Muestras

Ambientales. Tesis Doctoral. Valencia. Universidad Politécnica de Valencia. 292p.

CARRANZA, R. 2004. Gestión de la Calidad del Aire; Causas, Efectos y Soluciones. Trad. por Instituto de Investigación de Ingeniería Industrial. 1ed. Lima, Perú. 119p.

CORLETO, A. y CORTEZ, D. 2012. Comparación de los Métodos de Bergerhoff y Placas Receptoras para la Cuantificación de Polvo atmosférico Sedimentable. Tesis Lic. En Química y Farmacia. San Salvador, El Salvador. Universidad de El Salvador. 108p.

DE MIGUEL, E. 1995. Geoquímica Urbana de Elementos Traza. Tesis Doctoral. Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. 253p.

DE PASCUAL, A. 2011. Análisis de la Dispersión y Estrategias de Reducción de Emisiones y Partículas Atmosféricas Primarias de la Industria Cerámica. Tesis Doctoral. Madrid. Universidad Complutense de Madrid. 210p.

DIGESA. 2005. Protocolo de Monitoreo de la Calidad del Aire y Gestión de los Datos. 71p.

ESTEVEZ, J. 2010. Exposición Laboral a Contaminación Atmosférica: Material Particulado y Efectos Respiratorios en la Salud de Policías de Tránsito de Bogotá, Colombia 2008-2009. Tesis Magister en Toxicología. Bogotá, D. C. Universidad Nacional de Colombia. 178p.

- GONZALEZ, E. 2012. Valoración de la Calidad del Aire en la Zona Industrial Matanzas Sur. Tesis Magister en Ciencias Ambientales. Puerto Ordaz, Venezuela. Universidad Nacional Experimental de Guayana. 154p.
- INZA, A. 2010. Estudio de Series Temporales y Composición Química del Material Particulado Atmosférico en Distintas Áreas del País Vasco. Tesis Doctoral. Leioa, Vasco. Universidad del País Vasco. 276p.
- LOZANO, F. 2012. Determinación del Grado de Partículas Atmosféricas Sedimentables, Mediante el Método de Muestreo Pasivo, Zona Urbana-Ciudad de Moyobamba, 2012. Tesis Ingeniería Ambiental. Moyobamba, Perú. Universidad Nacional de San Martín. 61p.
- MALDONADO, M. 2012. Caracterización del material particulado suspendido PM10 de la Red de Monitoreo de Aire de la Ciudad de Quito de los años 2009 y 2010 por Espectroscopía de Absorción Atómica. Tesis Lic. Ciencias Químicas. Quito, Ecuador. Pontifica Universidad Católica del Ecuador. 116p.
- MARCOS, R., CABRERA, M., LAOS, H., MAMANI, D., VALDERRAMA, A. 2012. Estudio Comparativo para la Determinación del Polvo Atmosférico Sedimentable Empleando las Metodologías de Tubo Pasivo y de Placas Receptoras en la Ciudad Universitaria de San Marcos. Centro de Desarrollo e Investigación en Termofluidos. Lima, Perú. Pp. 1-10.

- MARCOS, R., VALDERRAMA, A. 2012. Contaminación del Aire por Material Particulado en la Ciudad Universitaria-UNMSM. Trad. por Víctor López. 1 ed. Lima, Perú, Guzlop. 14p.
- MIRANDA, K. y ORTIZ, L. 2008. Evaluación de la Concentración de Material Particulado Suspendido PM10 y su Relación con la Morbilidad Asociados A ERA'S en Niños Menores a Catorce Años por Enfermedad Respiratoria Aguda en el Municipio de Tolviejo (Sucre). Tesis Ingeniero Ambiental y Sanitario. Bogotá, D.C. Universidad de la Salle. 135p.
- MOREANO, D. I., PALMISANO, A. S. 2012. Nivel de Afectación de la Contaminación Atmosférica y sus Efectos en la Infraestructura del Campus Universitario Debido a la Emisión de Partículas PM10 y CO. Tesis Ingeniero Civil. Lima, Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú. 80p.
- PARRA, S. 2013. Determinación del Origen y Mecanismo de Contaminación por Metales y Metaloides en los Suelos del Valle de Puchuncaví (Chile). Tesis Doctor en Ciencias Mención Química. Valparaíso, Chile. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. 215p.
- REGALADO, A. 2015. Caracterización del Material Particulado del Aire Ambiente en la Ciudad de Loja. Tesis Ing. En Manejo y Conservación del Medio Ambiente. Loja, Ecuador. Universidad Nacional de Loja. 81p.
- RIVERA, J. 2012. Modelo de Identificación de Factores Contaminantes Atmosféricos Críticos en Lima – Callao. Tesis Magister en Ingeniería Industrial. Lima, Perú. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 150p.

- ROMERO, M., DIEGO, F., ÁLVAREZ, M. 2006. La Contaminación del Aire: Su Repercusión como Problema de Salud. Revista Cubana de Higiene y Epidemiología, La Habana, Cuba. Vol. 44, núm. 2: pp. 1-14.
- RUIZ, C. 2006. Caracterización del Material Particulado en las Principales Vías del Transporte Público Colectivo y Masivo del Centro de Bogotá. Tesis Programa de Ingeniería Ambiental. Bogotá, D. C. Universidad de los Andes. 91p.
- SEMIQUÉ, K. 2015. Evaluación de las Concentraciones de Contaminantes Sólidos Atmosféricos de Tres Estaciones de Monitoreo de la Ciudad de Iquitos, Mediante el Método Gravimétrico. Iquitos-2015. Tesis Ing. En Gestión Ambiental. Iquitos, Perú. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. 81p.
- SENAMHI. 2006a. Condiciones Climáticas, Hidrológicas y Ambientales en la región Huánuco, Ucayali y la Provincia de Tocache. Huánuco (Perú), Boletín Regional n° 08. 17p.
- SENAMHI. 2006b. Condiciones Climáticas, Hidrológicas y Ambientales en la región Huánuco, Ucayali y la Provincia de Tocache. Huánuco (Perú), Boletín Regional n° 09. 16p.
- SENAMHI. 2006c. Condiciones Climáticas, Hidrológicas y Ambientales en la región Huánuco, Ucayali y la Provincia de Tocache. Huánuco (Perú), Boletín Regional n° 10. 17p.

SULBARÁN, D. 2009. Conceptos Fundamentales Para el Análisis Estadístico de Datos. Universidad Central de Venezuela. 21p.

VIVAR, G.I., BORREGO, A.S. 2012. Estudio del polvo sedimentado en depósitos del Archivo Nacional. Archivo Nacional de la República de Cuba. Cuba. Boletín. 10p.

X. ANEXO

ANEXO A. Resultados de los análisis estadísticos

Cuadro 16. Análisis de varianza para el método de tubos pasivos.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	24,2281	6	4,0380	0,8554	0,5496	2,8477
Dentro de los grupos	66,0888	14	4,7206			
Total	90,3169	20				

Cuadro 17. Análisis de varianza para el método de placas receptoras.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	42,8626	6	7,1438	0,9978	0,4640	2,8477
Dentro de los grupos	100,2285	14	7,1592			
Total	143,0911	20				

Cuadro 18. Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales.

Estadísticos	Tubos Pasivos	Placas Receptoras
Media	4,9924	11,4847
Varianza	4,5158	7,1546
Observaciones	21	21
Varianza agrupada	5,8352	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	40	
Estadístico t	-8,7090	
P(T<=t) una cola	0,0000	
Valor crítico de t (una cola)	1,6839	
P(T<=t) dos colas	0,0000	
Valor crítico de t (dos colas)	2,0211	

Cuadro 19. Análisis de regresión de los dos métodos de monitoreo.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,8911
Coefficiente de determinación R ²	0,7941
R ² ajustado	0,7832
Error típico	0,9894
Observaciones	21

Cuadro 20. Comparación de los dos métodos.

Estadísticos	Placas	Tubos
Recuento	21	21
Promedio	11,4847	4,9924
Desviación Estándar	2,6748	2,1251
Coefficiente de Variación	23,29%	42,57%
Mínimo	6,3379	0,9201
Máximo	17,6166	10,4546
Rango	11,2787	9,5345
Sesgo Estandarizado	0,2936	1,7791
Curtosis Estandarizada	0,4724	2,0388

Cuadro 21. Coeficiente de correlación y de determinación entre las variables meteorológicas y concentración de material particulado sedimentable.

Variables	Coeficiente de Determinación (R^2)		Coeficiente de Correlación Pearson (R)	
	Tubos	Placas	Tubos	Placas
	Pasivos	Receptoras	Pasivos	Receptoras
Precipitación	0,992	0,887	-0,9960	-0,9420
Temperatura	0,976	0,991	-0,9877	-0,9954
Velocidad del Viento	0,912	0,998	-0,9551	-0,9989

ANEXO B. Datos meteorológicos de la estación CP Huánuco.

Cuadro 22. Temperatura máxima diaria (°C)

Día	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre
1	27,5	28,1	27,9	28,8	29,6
2	29,3	22,5	26,3	24	28
3	28	26	27	24,8	25,6
4	28,9	26,3	26,3	27	26,3
5	26,6	27,9	27	28,8	28,9
6	24	27	27,7	28,2	29,5
7	21,5	26,5	26,8	28,1	30
8	26,1	27,1	27,6	27,1	29
9	26,5	27,3	28	26,8	29,5
10	27,6	25,2	29	28	29,9
11	27,9	25,9	29	29,2	30,2
12	27,2	27,7	28,9	27,9	31,5
13	27,9	28,1	30,1	28,6	29
14	27,3	28,3	29,3	26,7	29
15	27,1	28	29,3	27,3	29,6
16	27,3	29	26,6	28	29,6
17	26,5	28,5	25,3	27,6	28,2
18	27,7	27,8	26,4	26,9	26
19	27,9	26,5	26,1	28,7	30,1
20	28,7	26	25,2	29,5	30,5

21	28,8	26,1	26,5	25,2	28
22	26,8	27,3	27,5	27,8	26,7
23	27,9	28,5	27,7	29,3	27,9
24	27,1	29	27,1	27,5	28,6
25	26,2	29,2	24,2	30,2	29,7
26	26,5	27,7	27,5	31	26,7
27	27,9	27,1	26,3	25	27,5
28	27,6	27	25,5	25,2	27,1
29	27,2	27,2	27,9	27,2	26
30	27,3	28,3	30,3	29,4	26,8
31	27,9	25,5		27	

Fuente: SENAMHI (2016).

Cuadro 23. Temperatura mínima diaria (°C)

Día	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre
1	9,5	12,5	16,4	18	15,5
2	10	15,7	14,8	15,7	18
3	10,5	9,5	14,9	15,5	17,2
4	10,2	15	16,3	16,1	17,4
5	10,6	14,8	16	17	16
6	15,5	15,8	15,8	16	16,9
7	15	14,7	15,9	16,4	19
8	14,7	15,5	11,7	15,6	18

9	15,1	17,1	13,9	16	13,6
10	10	16,9	15,2	17,6	14,9
11	10,2	15,7	14	16,6	13,4
12	9,9	16,4	12,7	17	19
13	10,4	12,6	13	17,9	16,3
14	12,6	10,6	13,5	15,9	18,5
15	13,5	10,4	16,5	14,4	17
16	11,5	14	13,5	16	17,8
17	13,8	11,9	14,9	15	17,6
18	12,5	14,1	13,9	15,7	16,4
19	13	15,1	15,7	14,7	15
20	10,1	15,7	15,4	14,2	12,9
21	9,2	15,4	14,6	14,6	15,1
22	9,1	16,3	15,3	15,5	15,6
23	9,5	15	15,2	14,9	15,7
24	10,3	12,1	15,3	17,7	13,8
25	10,4	13,8	15,2	14	15
26	13,4	12,4	16	16	17,2
27	12,7	12,1	14,5	17	16,6
28	12,5	12,9	15,4	15,7	16,7
29	14,1	12	12,5	14,1	16
30	14	12,5	16,4	13,4	15,9
31	13,9	13,7		13,5	

Fuente: SENAMHI (2016).

Cuadro 24. Precipitaciones diarias (mm)

Día	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre
1	0	0	T	4,4	0
2	0	0,5	0	0.6	1,5
3	0	0	0,4	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1,5	0
6	T	0	0	0	0
7	T	0	0	0	T
8	0,2	0	0	0	T
9	0	0	0	0	T
10	0	0	0	0	T
11	0	0	0	1,8	0
12	0	0	0	0	0
13	0	T	0	1,8	0
14	0	0	0	6,4	0
15	0	0	0	3,7	0
16	0	0	0	0	0
17	0	0	0	1,2	2,5
18	0	0	0	0	T
19	0	0,6	0	0	0
20	0	0	0	0	0
21	0	T	0	0	0
22	0	0	0	0	0

23	0	0	0	0	0
24	0	0	1	0	0
25	0	0	0	0	1,9
26	0	0	T	0	5,9
27	0	0	0,2	0	2,7
28	0	0	0,1	0	5,6
29	0	0	0	0	4,4
30	0	0	0	9,8	13
31	0	0		0	

Fuente: SENAMHI (2016).

Cuadro 25. Dirección de viento diaria 07 horas.

Día	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre
1	C	C	C	C	C
2	C	C	C	C	C
3	C	C	C	C	C
4	C	C	C	C	C
5	C	C	C	C	C
6	C	C	C	C	C
7	C	C	C	C	C
8	C	C	C	C	C
9	C	C	C	C	C
10	C	C	C	C	C
11	C	C	C	C	C

12	C	C	C	C	C
13	C	C	C	C	C
14	C	C	C	C	C
15	C	C	C	C	C
16	C	C	C	C	C
17	C	C	C	C	C
18	C	C	C	C	C
19	C	C	C	C	C
20	C	C	C	C	C
21	C	C	C	C	C
22	C	C	C	C	C
23	C	C	C	C	C
24	C	C	C	C	C
25	C	C	C	C	C
26	C	C	C	C	C
27	C	C	NW	C	C
28	C	C	C	N	C
29	C	C	C	C	C
30	C	C	C	C	C
31	C	C		C	

Fuente: SENAMHI (2016).

Cuadro 26. Dirección de Viento Diaria 13 horas.

Día	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre
1	NE	N	N	NE	N
2	N	N	N	NE	NE
3	NE	N	NE	NE	NE
4	NE	N	N	N	N
5	N	NE	N	N	N
6	NE	N	NE	NE	N
7	N	NE	NE	NE	N
8	NR	NE	NE	N	NE
9	N	NE	NE	NE	N
10	N	N	NE	NE	N
11	N	NE	NE	NE	NE
12	N	N	N	NE	N
13	N	NE	N	N	NE
14	N	N	NE	NE	N
15	NE	N	NE	N	N
16	N	N	N	NE	NE
17	NE	N	NW	N	N
18	N	NE	NE	NE	NE
19	NE	N	N	NE	N
20	NE	NE	NE	N	NE
21	N	NE	NE	N	N
22	N	N	NE	N	NE

23	NE	N	NE	NE	NE
24	NE	N	NE	NE	NE
25	N	NE	N	NE	N
26	NE	NE	NE	N	N
27	N	N	N	N	N
28	NE	NE	NE	N	N
29	NE	N	N	N	N
30	N	N	NE	NE	N
31	N	NE		N	

Fuente: SENAMHI (2016).

Cuadro 27. Dirección de Viento Diaria 19 horas.

Día	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre
1	N	NE	N	NE	N
2	N	N	N	N	N
3	N	N	NE	N	N
4	N	NE	NE	NE	N
5	NE	N	N	NE	NE
6	N	NE	NE	SE	N
7	N	N	N	N	N
8	N	N	N	N	NE
9	N	N	NE	N	N
10	N	N	N	NW	NE
11	N	N	N	N	N

12	NE	NE	N	NE	N
13	N	N	NE	N	N
14	N	N	NE	NE	N
15	N	N	N	N	N
16	NE	N	NE	N	N
17	NE	N	N	SE	N
18	N	N	N	N	N
19	N	N	NE	N	N
20	N	NE	N	N	NE
21	NE	N	NE	NE	N
22	NE	N	N	N	N
23	NE	NE	NE	N	NE
24	N	NE	N	NE	N
25	N	NE	NE	N	N
26	N	NE	N	N	N
27	N	NE	NE	N	N
28	NE	N	N	N	NE
29	N	NE	NE	N	N
30	N	N	NE	SE	N
31	N	N		N	

Fuente: SENAMHI (2016).

Cuadro 28. Velocidad de Viento a las 07 horas (m/s).

Día	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0

23	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0
27	0	0	2	0	0
28	0	0	0	2	0
29	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0
31	0	0		0	

Fuente: SENAMHI (2016).

Cuadro 29. Velocidad de Viento a las 13 horas (m/s).

Día	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre
1	6	4	8	6	8
2	6	6	6	6	8
3	6	6	8	2	6
4	8	8	8	6	8
5	8	6	10	6	8
6	6	8	8	8	6
7	6	4	10	10	6
8	2	6	8	10	6
9	2	4	6	6	4
10	4	6	4	8	6
11	6	6	6	8	6

12	6	8	8	8	8
13	8	10	8	8	10
14	8	8	8	6	10
15	6	6	4	6	10
16	8	4	6	6	6
17	8	6	2	8	6
18	4	6	8	8	4
19	2	4	4	4	8
20	4	8	2	8	10
21	2	6	8	4	8
22	6	4	6	8	8
23	6	4	6	10	10
24	8	6	6	6	8
25	8	6	8	6	10
26	6	8	6	8	6
27	4	8	4	8	6
28	6	10	6	8	6
29	8	8	10	8	2
30	8	6	8	6	4
31	4	10		10	

Fuente: SENAMHI (2016).

Cuadro 30. Velocidad de Viento a las 19 horas (m/s).

Día	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre
1	8	6	6	8	8
2	8	2	8	4	8
3	8	8	6	8	6
4	8	6	8	8	8
5	6	8	8	4	8
6	4	6	6	4	2
7	2	8	8	8	4
8	6	8	8	8	4
9	6	6	8	4	8
10	8	8	8	6	6
11	6	8	8	10	8
12	4	6	8	8	6
13	2	8	8	6	8
14	6	6	8	8	8
15	8	4	4	4	8
16	8	8	4	8	4
17	6	8	4	6	6
18	6	8	2	6	4
19	6	4	6	6	10
20	6	6	4	6	8
21	4	8	6	6	8
22	8	6	8	6	10

23	8	6	4	6	8
24	6	8	8	8	4
25	6	6	6	8	8
26	8	6	8	6	4
27	8	6	8	6	4
28	8	8	4	8	6
29	8	6	4	6	8
30	8	8	6	4	6
31	6	8		6	

Fuente: SENAMHI (2016).

ANEXO C. Preparación de muestras



Figura 19. Materiales para la preparación de las muestras.



Figura 20. Rotulado de los tapones y las placas.

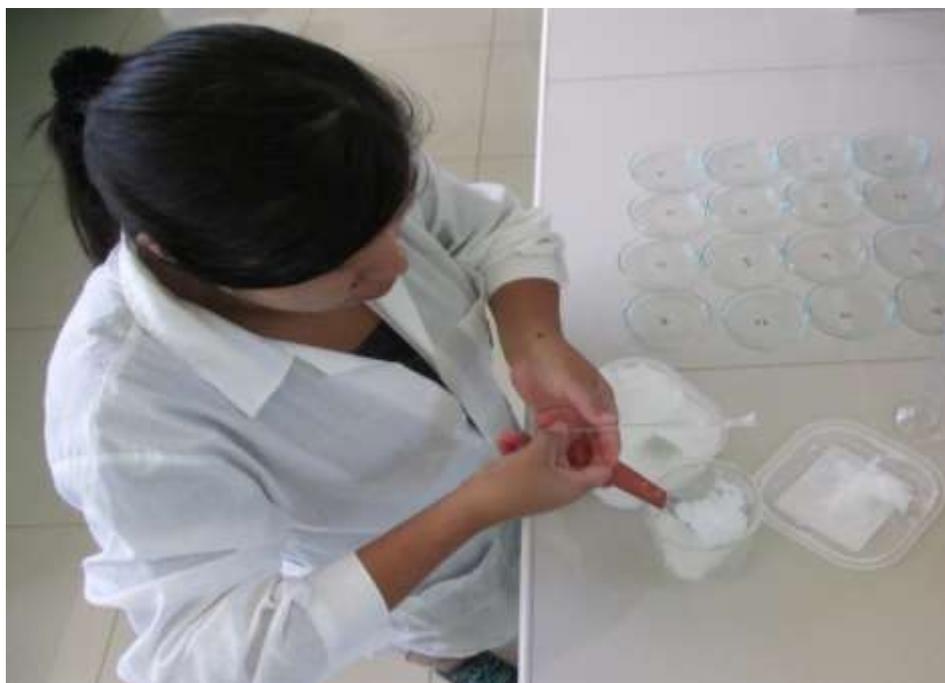


Figura 21. Preparación de la vaselina para su fundición.



Figura 22. Fundición de la vaselina para ser vertida en las placas.



Figura 23. Vaselina líquida.



Figura 24. Vertiendo la vaselina en las placas Petri.



Figura 25. Muestras preparadas para el método de placas receptoras.



Figura 26. Pesado de las placas contenidas con vaselina.



Figura 27. Muestras preparadas de las placas receptoras cubiertas con papel de aluminio para ser trasladadas.



Figura 28. Caja conservadora (tecnopor) para el traslado de las muestras.



Figura 29. Secado de los filtros para obtener peso constante.



Figura 30. Pesado de los tapones de los tubos.



Figura 31. Pesado de los tapones que contienen el papel filtro.



Figura 32. Cubierta de aluminio para los tapones.

ANEXO D. Análisis de las muestras colectadas.



Figura 33. Recojo de muestras de los tubos pasivos.



Figura 34. Recojo de muestras de las placas receptoras.



Figura 35. Pesado de las muestras colectadas por el método de tubos pasivos.



Figura 36. Filtración del agua que contiene material particulado sedimentable.



Figura 37. Filtros contenidos con material particulado sedimentable.



Figura 38. Ubicación de los filtros en las placas para ser colocadas en la estufa.



Figura 39. Secado de los filtros que contienen material particulado sedimentable.



Figura 40. Deseccando los filtros que contienen material particulado sedimentable.



Figura 41. Papel filtro desecado que contiene material particulado sedimentable.

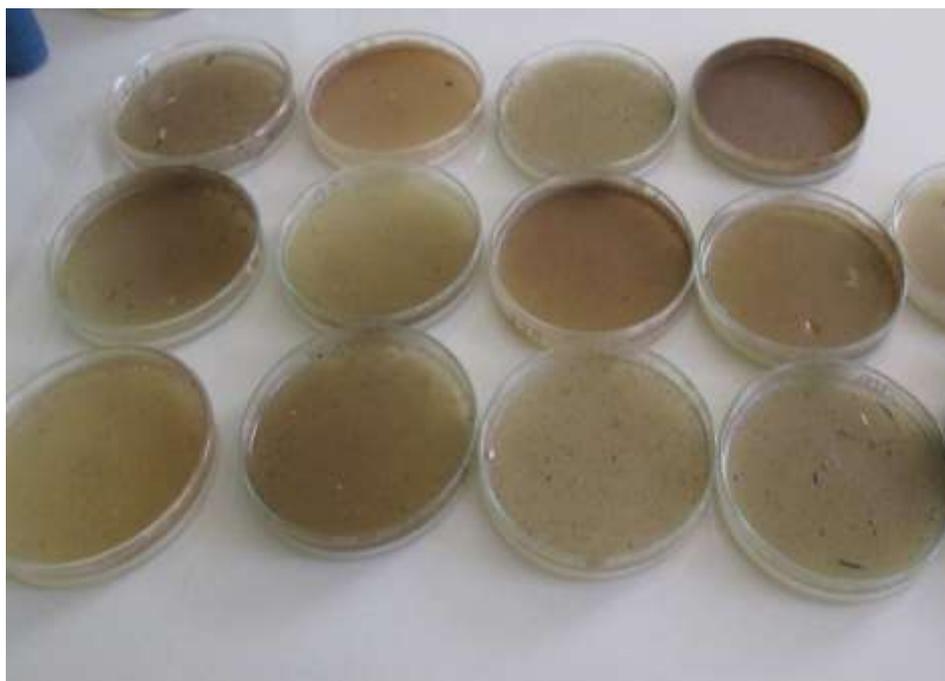


Figura 42. Muestras colectadas por el método de placas receptoras.



Figura 43. Pesado de las muestras de placas receptoras.



Figura 44. Muestras colectadas del punto 5 (La Esperanza) por el método de placas receptoras.



Figura 45. Muestras colectadas en el punto 4 (Huánuco) por el método de tubos pasivos.



Figura 46. Muestras colectadas del punto 1 (Cayhuayna alta) por el método de placas receptoras.

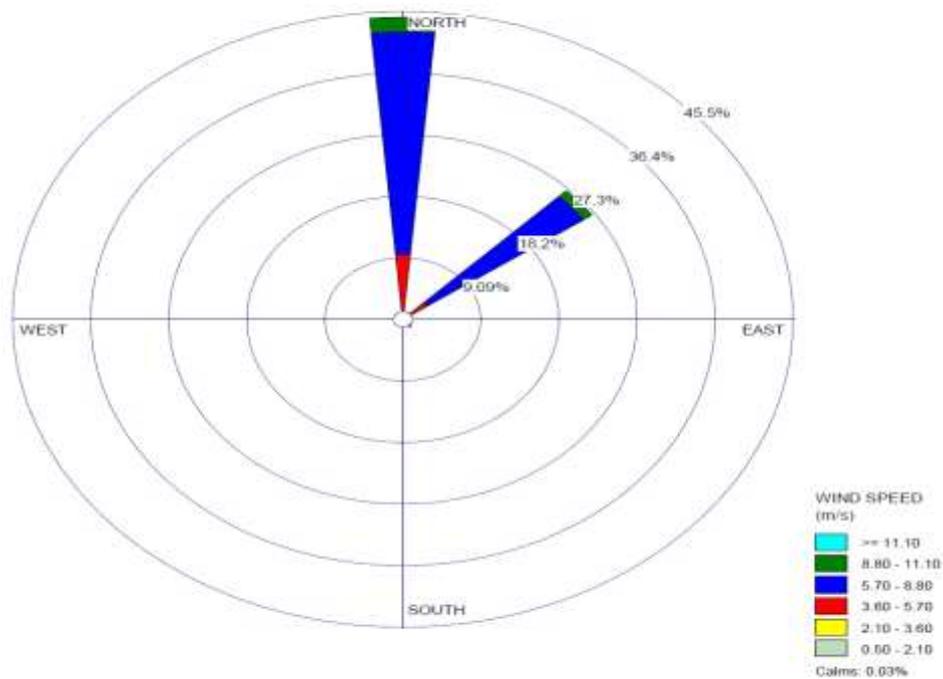


Figura 47. Rosas de viento.

ANEXO E. Mapa de ubicación de los puntos de monitoreo.

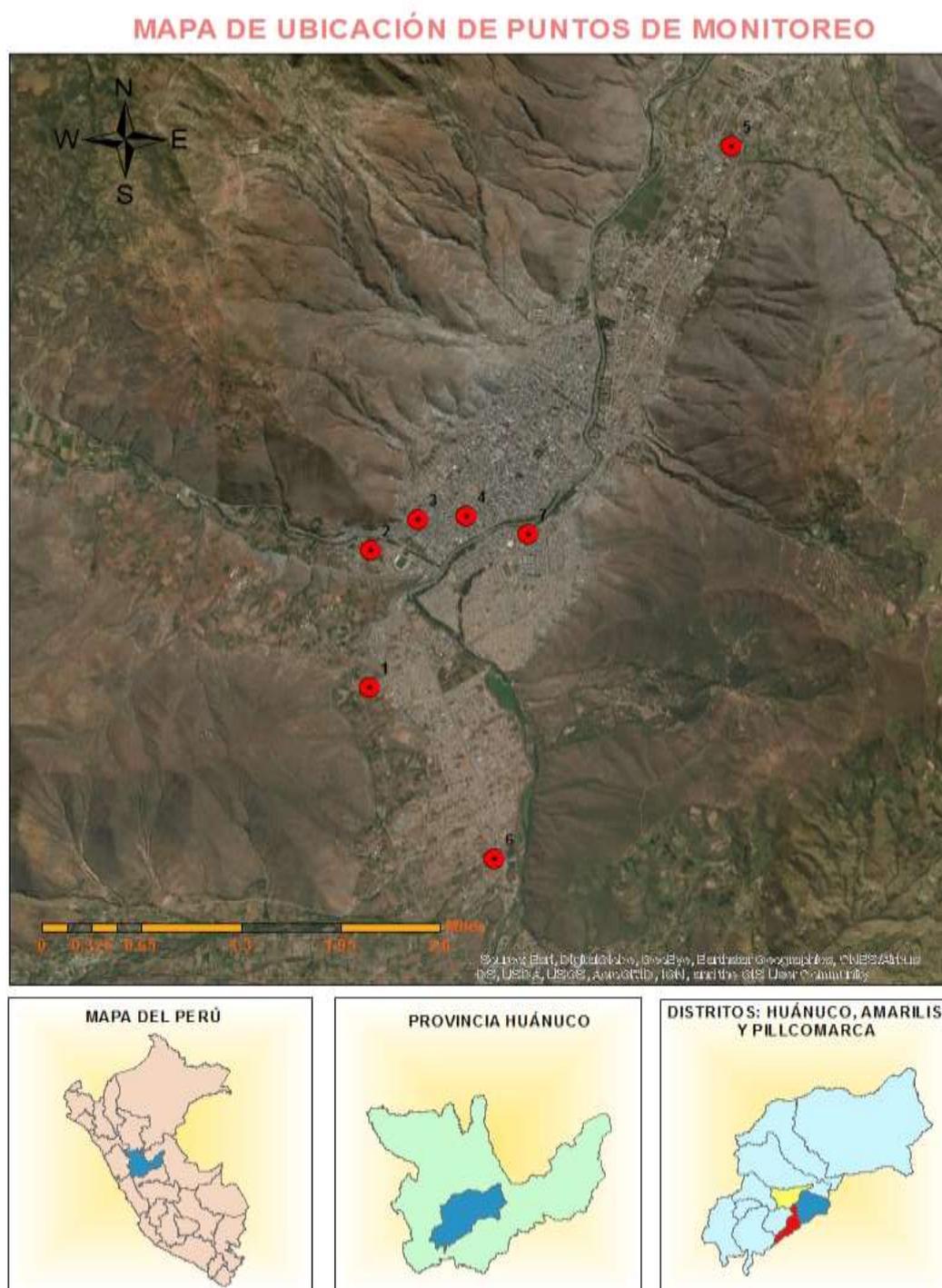


Figura 48. Ubicación de los puntos de monitoreo