

Artículo original

PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES (PST) Y FLUJO VEHICULAR EN UNA AVENIDA DE LA CIUDAD DE TACNA

TOTAL SUSPENDED PARTICULATE MATTER (TSP) AND VEHICULAR FLOW ON AN AVENUE IN TACNA CITY

RICHARD SABINO LAZO RAMOS¹

 <https://orcid.org/0000-0002-7878-7486>

CARMEN ROSA ROMÁN ARCE²

 <https://orcid.org/0000-0003-1601-1794>

HAYDEE RAQUEL SISA YATACO³

 <https://orcid.org/0000-0003-1171-3826>

BRIAYAN RENSO MAMANI VARGAS⁴

 <https://orcid.org/0000-0002-7644-755X>

STEPHANO EDUARDO UGARTE LANCHIPA⁵

 <https://orcid.org/0000-0002-0415-0837>

Recibido: 08/07/2022

Aceptado: 10/09/2022

Publicado: 14/11/2022

^{1,2,3}Docente Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Universidad Privada de Tacna,

^{4,5}Estudiante Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Universidad Privada de Tacna

E-mail: ¹riclazor@virtual.upt.pe, ²carromana@virtual.upt.pe, ³harsisa@virtual.upt.pe,
⁴bm2018000406@virtual.upt.pe, ⁵su2018060840@virtual.upt.pe

Resumen

La investigación tuvo como objetivo evaluar las partículas suspendidas totales (PST) del flujo vehicular en la avenida Cusco de la ciudad de Tacna. El estudio se desarrolló entre los meses de febrero y abril del año 2022, utilizando el método gravimétrico mediante colectores pasivos de polvo. Se fijaron estaciones de monitoreo en 14 puntos ubicados en ambos carriles lo largo de la avenida, se recolectaron los datos de concentración por periodos parciales de 30 días cada una. Simultáneamente, se midió el flujo vehicular respecto a las estaciones. Los resultados muestran que, en seis estaciones de monitoreo, la concentración de PST sobrepasó el valor guía (5 ton/km² /mes) establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS). No se encontró correlación significativa entre los valores de las partículas y el flujo vehicular. Se concluye que las concentraciones de material particulado estarían más bien ocasionadas por intrusión de polvo, asociadas a las variables climáticas y ubicación geográfica de la zona.

Palabras clave: Polvo atmosférico sedimentable; flujo vehicular; condiciones atmosféricas.

Abstract

The objective of this research was to evaluate the total suspended particulate matter (TSP) from the vehicular flow on Cusco Avenue in the city of Tacna. The study was carried out between February and April 2022, using the gravimetric method through passive dust collectors. Monitoring stations were set up in 14 points located on both lanes along the avenue, and the concentration data was collected for partial periods of 30 days each. Simultaneously, the vehicular flow was measured with respect to the stations. The results show that in six monitoring stations, the TSP concentration exceeded the guideline value (5 ton/km² /month) established by the World Health Organization (WHO). No significant correlation was found between particulate matter values and vehicular flow. It is concluded that, the concentrations of particulate matter would be rather caused by dust intrusion associated with the climatic variables, and geographical location of the area.

Keywords: Sedimentable atmospheric dust; vehicular flow; atmospheric conditions.

1. Introducción

Año tras año el planeta se deteriora por las grandes descargas de contaminantes que recibe, ya sean al aire, agua o suelo, así la calidad de aire es uno de los principales indicadores para comprobar los niveles de contaminación ambiental, el aire puede contener una gran cantidad de partículas suspendidas que provienen principalmente del transporte, las instalaciones residenciales, recreativas, educativas e industriales (Abali et al., 2018), la contaminación atmosférica referida a las Partículas Suspendidas Totales (PST) permanecen en la troposfera por semanas y subsecuentemente pueden ser transportadas a grandes distancias. Si el material particulado en la fracción respirable sobrepasa el límite máximo permisible, genera contaminación ambiental (Rojas y Huamán, 2017). Las partículas finas son de preocupación e importancia por ser depositadas en el fondo de la laringe y penetrar pulmones e incluso en el torrente sanguíneo (Schwartz et al., 1996; EPA 2012), estas partículas pueden ser cualquier material sólido o líquido dividido finamente que tiene tamaños de 0,0002 y 500 μm (Rojano et al., 2013), en esta clasificación se tiene a las PST que tienen un rango de 0,005 y 100 μm (EPA 1996; INE 2010). En algunas ciudades, la contaminación por PST y PM10 son consideradas como un problema crítico y están influenciados por el tráfico vehicular, trabajos de construcción, talleres, operaciones industriales y otras actividades económicas (Celis et al., 2007; Vara 2016).

Estudios realizados en áreas de alto tráfico vehicular se mostraron que la relación de estos contaminantes, es mayor cuando el parque automotor fluye cerca de las zonas de muestreo (Rojano 2013, Galvis y rojas 2006; Echeverri et al., 2008), estas partículas se ven consolidadas más con la presencia de intrusión de polvo en zonas desérticas.

La ciudad de Tacna, ubicada en la cabecera del desierto de Atacama, presenta una gran intrusión de polvo que hace que las PST sean significativas, tal como ocurre en áreas áridas y semiáridas, el depósito de polvo ocurre extensamente (Motamedi et al., 2022), sumado al flujo de su transporte automotor en crecimiento, hace que en zonas de congestión vehicular sea crítico; entre otras vías; el tráfico vehicular es significativo en la avenida Cuzco, que sirve de conexión principal con el distrito colindante denominado Gregorio Albarracín; según (EXYZ, año), el tráfico vehicular en horario punta por cada 15 min, se registra aproximadamente 1076 vehículos en dirección sur a norte y 856 vehículos en dirección norte al sur. En un estudio realizado por Urbina Cantuta & Torres Flores (2018), se determinó que la avenida Cusco y calles adyacentes son consideradas como intersecciones de importante impacto por el tráfico vehicular, en ese contexto, existe se afirmaba la posibilidad de que las partículas suspendidas totales superen los Estándares de Calidad Ambiental, situación que tiene alta probabilidad en provocar serios impactos en la salud de la población, ya que la contaminación proviene gran parte del parque automotor.

2. Objetivo

El objetivo de este estudio fue determinar si el nivel de concentración de las partículas suspendidas totales (PST) estaba influenciada por el tráfico vehicular y compararla con estándares ambientales.

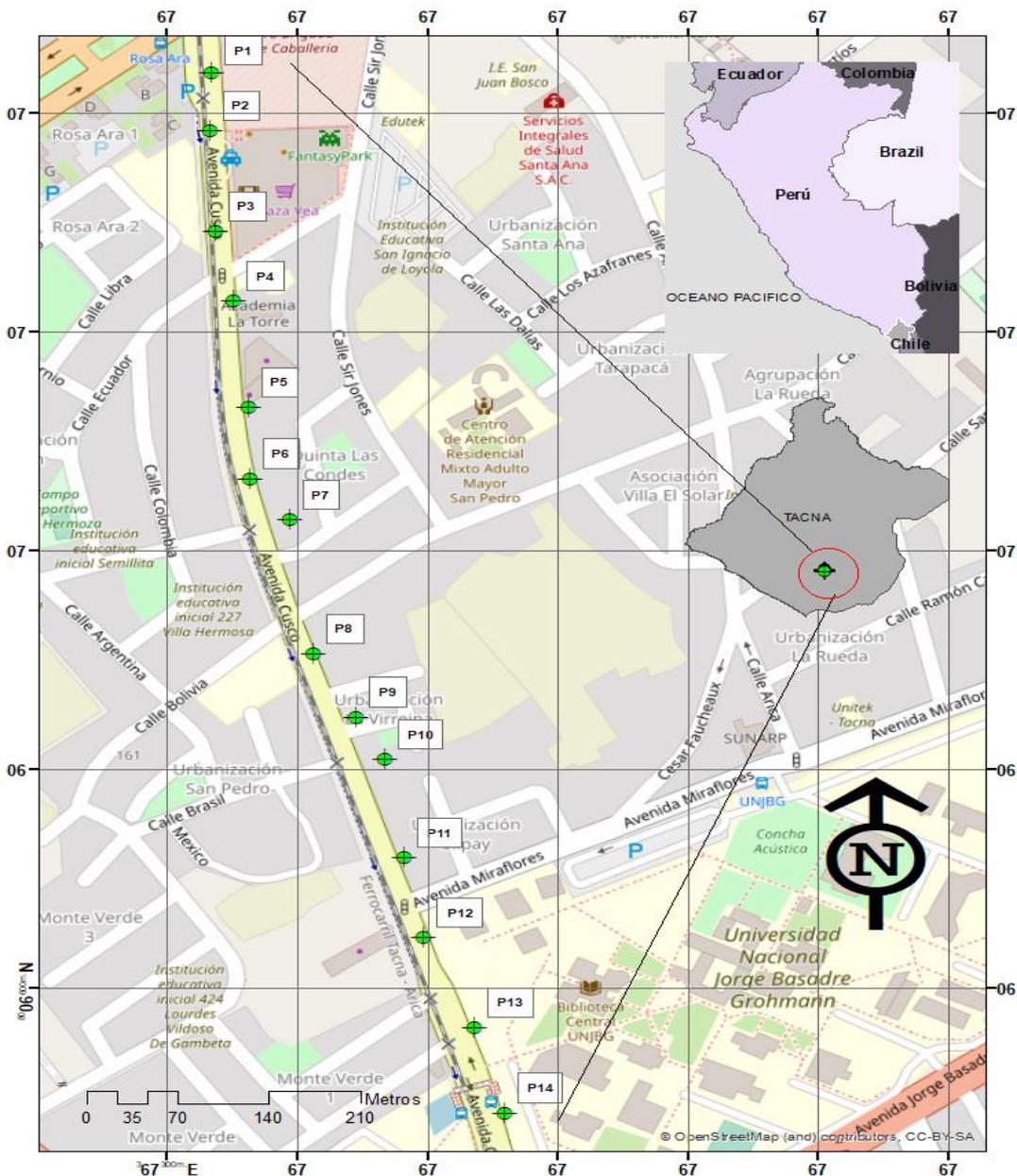
3. Metodología

3.1. Selección de los puntos de monitoreo y ubicación de los colectores

Para determinar las concentraciones promedio de PST, en la atmósfera de la zona de estudio se establecieron 14 puntos de estudio, considerando la dirección del viento y el flujo vehicular, considerando que hay vías alimentadoras a la avenida, tal como se observa en la figura 1.

Figura 1

Ubicación de los puntos de muestreo en coordenadas UTM WGS 86 en la avenida Cusco



El material particulado total (PST) se determinó utilizando el método gravimétrico establecido en el Método estándar para la determinación del material particulado en suspensión del Código de Regulaciones Federales (CFR) de la EPA (Apéndice B de la Parte 50 - Método de referencia para la determinación). Tratamiento de partículas volátiles atmosféricas: un método de gran volumen) empleando colectores de polvo que, a comparación del método de Placas receptoras, logran captar mayor cantidad de polvo sedimentable atmosférico, durante el mismo periodo (Vargas, 2019), también Marcos et al. (2008), refieren que la metodología de colectores de polvo es la más exacta que las placas receptoras.

Antes de ubicar los frascos o colectores de polvo en campo, se lavaron previamente con detergente. Luego cada frasco se llenó con un litro de solución de sulfato de cobre a concentración de 10 gramos por litro de agua destilada y se codificó para luego ser ubicados en los postes de alumbrado público, una altura de 2,5 cm, en cada estación de monitoreo a lo largo de los dos carriles de la avenida. Después de la instalación se estableció la ubicación georreferenciada con el equipo Global Positioning System (GPS) dejándose los colectores por periodos de 30 días, al hacer el recojo se cubre con papel Kraft para proteger la muestra y transportarla al laboratorio para su análisis. Los datos meteorológicos fueron suministrados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), sede Tacna (Tabla 1).

Tabla 1

Parámetros meteorológicos en el periodo de muestreo

Parámetro	Media \pm SD	Máximo	Mínimo
Temperatura Mínima (°C)	17,27	19,80	15,80
Temperatura Máxima (°C)	27,72	29,60	25,80
Viento (km/s)	4,58	7,00	3,00
Humedad Relativa (%)	73,20	81,10	68,80
Precipitación (mm de H ₂ O)	0,00	0,00	0,00

3.2. Muestreo por el método pasivo de colectores de polvo

La concentración total de partículas se calcula como la masa de partículas recolectadas y corregidas con según las condiciones estándar. Para el cálculo del PST una vez finalizada el periodo de muestreo, los colectores se aforan con agua destilada, luego se filtran en papel filtro y este se deseca en una estufa, el papel filtro se pesa una vez equilibrado la humedad para determinar el peso (masa) ganado, mediante este procedimiento se calcula el valor del Material Sedimentable Insoluble (MSI) que se aprecia en la ecuación 1. A partir de líquido filtrado, se evapora una alícuota de 100 ml del líquido filtrado, el proceso demora unos 40 minutos por

muestra, de forma similar al procedimiento anterior se calcula el valor del Material Sedimentable Soluble (MSS) mostrado en la ecuación 2, a este valor se resta 1 g de peso por la adición inicial de cobre. Con la suma de estos dos valores (MSSI y MSS) se obtiene el PAS total mensual del método de colectores de polvo que se representa como PST. Para expresar el peso total por área (g/cm^2) se toma en cuenta que el área del equipo ($1\ 810,98\ \text{cm}^2$) y se expresa este valor en Ton/km^2 para hallar la relación con el valor guía ($5\ \text{Tn}/\text{km}^2/30\ \text{días}$; $0,5\ \text{mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$) que establece la OMS para Polvo Atmosférico Sedimentable.

$$MSI = (P_{ff} - P_{if})30 \quad (1)$$

MSI = Material Sedimentable Insoluble (g); P_{ff} = Peso final del papel filtro seco luego de filtrar la muestra (g) y P_{if} = Peso inicial del papel filtro seco antes de filtrar la muestra (g); 30 días.

$$MSS = (P_{fv} - P_{iv})30 \quad (2)$$

MSS = Material Sedimentable Soluble (g); P_{fv} = Peso final del vaso luego de evaporar el agua (g); P_{iv} = Peso inicial del vaso antes de evaporar el agua (g); 30 días.

$$PAS_{total} = (MSI - MSS)30 \quad (3)$$

3.3. Medición del flujo vehicular

La medición del flujo vehicular puede dar a conocer sus características y el comportamiento del tránsito, el flujo vehicular está asociado a diversas variables como el volumen, el intervalo, el espaciamiento, la distancia y el tiempo, requisitos básicos para el planeamiento, organización y operaciones viales (Alpizar y Del Risco, 2012). Para los fines del estudio se midió la tasa de flujo, que es la frecuencia a la que pasan los vehículos por un punto (estación de monitoreo) o sección transversal de la calzada, por tanto, la tasa de flujo es en números de vehículos que pasan durante el intervalo de tiempo, expresada en Veh/min. Se contabilizó todo tipo de vehículos motorizados en ambos sentidos de la avenida.

3.4. Elaboración de mapas de dispersión

Para la elaboración de mapas de dispersión se empleó la interpolación de la Distancia Inversa Ponderada (IDW) que estima valores desconocidos al especificar la distancia de búsqueda, los puntos más cercanos, el ajuste de potencia y las barreras. Se procesó los datos de concentraciones de PST obtenidas en campo, haciendo uso de un sistema de interpolación geoestadístico generando isolíneas para generar un mapa de dispersión a partir de los 14 puntos. El mapa final (figura 2) se elaboró mediante la caja herramienta de ArcMap, diseñados para mejorar la captura, almacenamiento, actualización, manipulación, análisis y despliegue de cualquier información referenciada geográficamente.

4. Resultados

El rango de las concentraciones de PST en las estaciones de monitoreo se muestra en la tabla 2, se registró un mínimo de 2,80 tn/km² en la estación de monitoreo P5, mientras que el máximo y el promedio geométrico más alto se registró en la estación de monitoreo P8 con 21,14 tn/km² y 21,12 tn/km² respectivamente, de forma gráfica se representan en la figura 2. En relación al flujo vehicular, se registra un mayor flujo vehicular en la estación de monitoreo P1, que está situado al inicio de la avenida en dirección norte a sur, de forma similar existe un tráfico similar en la estación de monitoreo P14, que tiene un desfogue hacia un ovalo. Ambos puntos son puntos de mayor tráfico en horas punta; el P14 se convierte en una entrada colectora en horarios matutinos por el flujo vehicular que proviene del distrito colindante hacia el sur, mientras que en el P1 ocurre algo similar al medio día y horas de la tarde cuando la población se traslada hacia el mismo distrito.

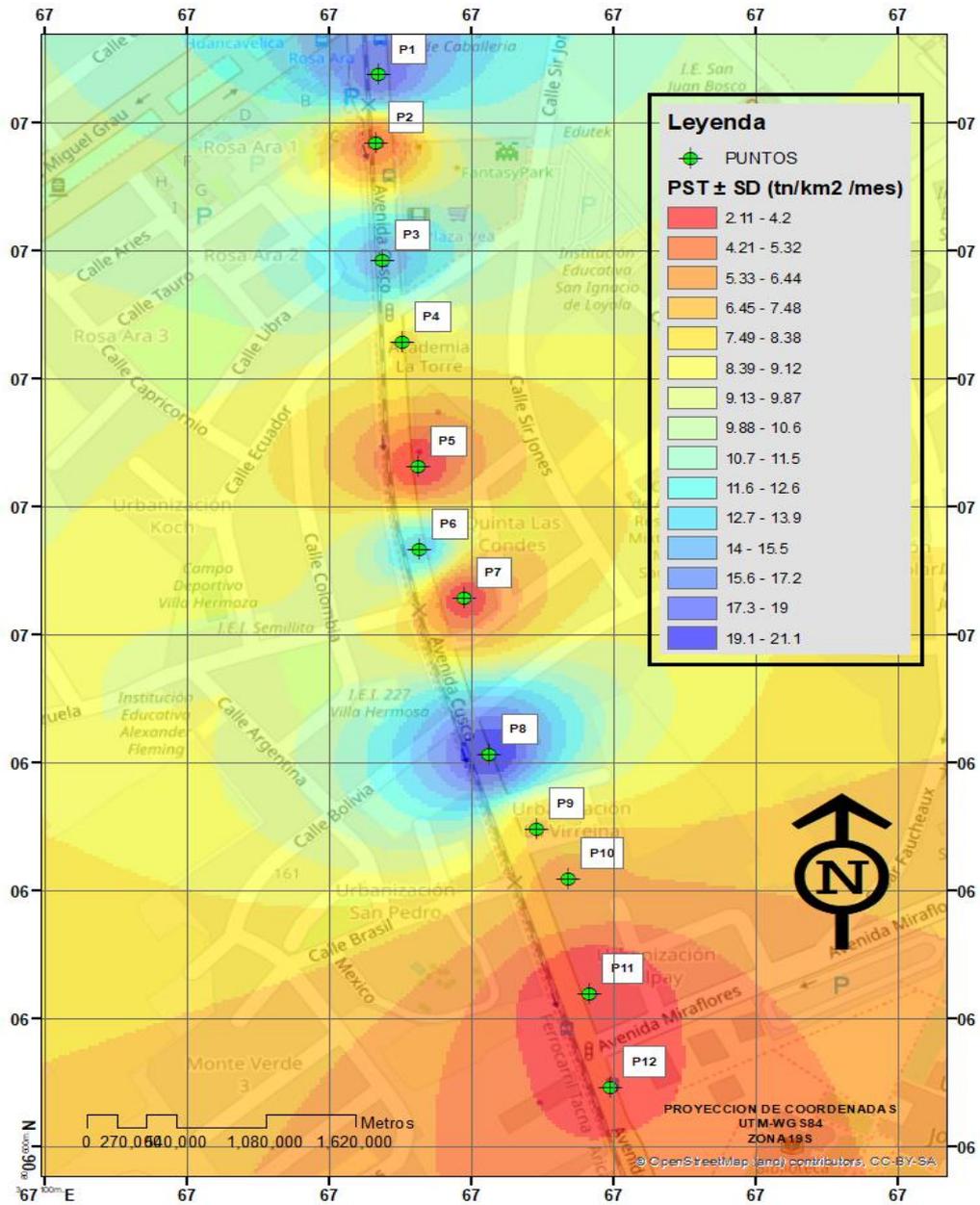
Tabla 2

Concentración promedio de partículas PST y tráfico vehicular

Estación de monitoreo	Min	Max	PST \pm SD (tn/km ² /mes)	Flujo Vehicular Vehículos/min \pm SD
P1	18,29	19,03	18,71 \pm 0,38	28,5 \pm 4,94
P2	3,64	3,93	3,78 \pm 0,15	22,0 \pm 1,41
P3	14,75	14,82	14,78 \pm 0,04	19,0 \pm 5,65
P4	8,16	8,24	8,20 \pm 0,04	18,5 \pm 0,7
P5	2,80	2,98	2,89 \pm 0,09	18,5 \pm 2,12
P6	13,39	13,5	13,44 \pm 0,06	14,0 \pm 0,00
P7	3,21	3,26	3,23 \pm 0,03	18,5 \pm 0,70
P8	21,1	21,14	21,12 \pm 0,02	17,5 \pm 7,77
P9	7,31	7,35	7,33 \pm 0,02	16,5 \pm 0,70
P10	4,29	5,61	5,07 \pm 0,71	17,5 \pm 2,12
P11	2,09	2,11	2,10 \pm 0,01	18,5 \pm 3,53
P12	3,33	3,48	3,40 \pm 0,08	24,0 \pm 1,41
P13	5,07	5,12	5,09 \pm 0,03	18,5 \pm 4,94
P14	3,21	4,76	4,05 \pm 0,80	28,0 \pm 11,31

Para comprobar la relación de las mediciones PST y el flujo vehicular, la prueba no paramétrica de (Rho de Spearman = -0,153; P-valor = 0,601) confirma que ambas variables no se relacionan estadísticamente.

Figura 2
Niveles de partículas sedimentables por puntos de muestreo



5. Discusión

Como se puede observar en la tabla 1, seis estaciones excedieron las 5 ton/km² lo establecido por la Organización Mundial de Salud (OMS), en estudios similares en la ciudad de Tacna, se reportó valores superiores (5,7 a 18 Tn/km²) a lo indicado por este organismo en una zona industrial donde se ubica una ladrillera ubicada a menos de 10 km en la misma dirección del viento (Vargas, 2019), otro estudio que evidenció valores muy superiores al estándar, fue el

realizado por Méndez y Morán (2020), quienes evaluaron la concentración de polvo atmosférico sedimentable en el área de influencia directa de la zona industrial del mercado de Tacna utilizaron el método de placas receptoras que arrojaron valores muy altos ($16,53 \text{ mg/cm}^2 = 165,3 \text{ t/km}^2$), por otro, lado en un estudio realizado por Rodríguez (2018) sobre Contaminantes Sólidos Sedimentables (CSS) o PAS utilizando el método de placas en el distrito de Castillo Grande, Región Huánuco, encontró que en cinco puntos de monitoreo, se excedía el Límite Máximo Permisible (LMP) de $5 \text{ Tn/km}^2/30 \text{ días}$, asumiendo que estos valores estaban relacionados a obras civiles realizados en distritos colindantes, además que estarían influenciados por condiciones climáticas favorables comparados con otros meses.

Otros estudios (Miranda y Merma; Carrión y Azya, 2019) realizado en áreas más próximas al área de estudio reportaron que los valores en la zona urbana de Tacna ($1,07 \text{ mg/cm}^2 = 10,70 \text{ t/Km}^2$) y zonas de extracción de agregados ($196 \text{ Tn/km}^2 / \text{mes}$) exceden de forma similar al estudio realizado.

También es recurrente encontrar estudios donde se demuestra que los valores guía de la OMS son superados especialmente en zonas de actividad industrial y económica, como el caso reportado por Bravo (2017) que encontró un equivalente a $10 \text{ tn/km}^2/30 \text{ días}$.

Respecto al tráfico vehicular, Urbina Cantuta & Torres Flores (2018), determinaron que la avenida Cusco y calles adyacentes son consideradas como intersecciones de importante impacto por el tráfico vehicular, y se afirmaba la posibilidad que las PST superen los Estándares de Calidad, no obstante ello, como se ha mencionado anteriormente, el tráfico vehicular no estaría influyendo en la acumulación de PST, según la prueba de correlación, aun cuando en algunos puntos de monitoreo donde se registró mayor tráfico vehicular, se observa que también el PST es alto, sin embargo, no sigue el mismo patrón en todo los puntos, ello pudiera deberse a las características de la vía que consta de dos carriles amplios a partir de la estación P3 en adelante, así como las direcciones de la vía que va de sur a norte o viceversa, este sentido es perpendicular a la dirección del viento que va en dirección sureste, de hecho en el periodo de monitoreo se registró niveles de velocidad de viento de 7 km/h , esto indicaría que no hay aporte significativo del flujo vehicular en los niveles de concentraciones de PST, y que más bien estaría relacionado con la intrusión de partículas de polvo que proviene del desierto de Atacama, tal como ocurre en otras ciudades, se ha conocido que el polvo en desiertos como el de Sahara (Méndez et al., 2018; Gioda et al., 2007; Poleo y Briceño-Castillo 2014; Gyan et al., 2005) puede ser levantado por convección en las zonas desérticas con mayor temperatura, lo que puede hacer alcanzar alturas considerables y luego trasportarse por masas de aire a ciudades, incluso cruzando océanos causando impactos negativos como la reducción de la visibilidad, aumento de temperatura superficial y episodios de afectación a la salud humana. Tal como indica López et al. (2008), los episodios de polvo contribuyen a la superación de límites de partículas y se presentan en patrones estacionales y frecuentes en algunos momentos del año que están asociados al clima como el movimiento del aire, tal como ocurre en Tacna donde se tiene patrones de viento con más intensidad en los meses de verano con valores máximos de 25 km/h .

Lo anterior da una idea de que los patrones de contaminación por PST estaría caracterizado por la influencia de su localización geográfica (cercano a zonas desérticas), orográfica y meteorológica, tal como afirma López et al., lo que determinan la calidad del aire con niveles importantes de partículas de origen natural, así como su estacionalidad. La concentración y distribución de tamaños aerodinámicos del material particulado, depende de muchas variables locales en las zonas de estudio, como afirma Arciniégas (2012), así las consecuencias relacionadas con altos niveles de material articulado en la atmósfera, están altamente asociadas con las enfermedades cardiorrespiratorias, deterioro de materiales y otros efectos. Tal como se encontró en este estudio, las PST suelen presentar valores más altos en épocas de verano (Motamedi et al., 2022), debido a vientos y precipitaciones más notables.

Dada las limitaciones del estudio que enfoca principalmente la estimación de PST, queda por determinar partículas más específicas como PM10 y la composición química de dichas partículas, de esta forma se podría tener una idea más clara de la procedencia de las partículas, sean del flujo vehicular o por la intrusión de partículas de polvo que provienen del desierto.

6. Conclusiones

Las concentraciones obtenidas de PST en seis puntos de muestreo sobrepasaron las 5 ton/km² /30 días establecidos como valor guía de la OMS, durante el tiempo de muestreo, si bien en algunas estaciones de monitoreo los valores de PST son altos, no existe correlación con los patrones de flujo de transporte, por lo que se puede concluir que las concentraciones de material particulado estarían más bien ocasionadas por intrusión de polvo, asociadas a las variables climáticas y ubicación geográfica de la zona.

7. Referencias Bibliográficas

- Abali, H., Etebu, O.M. & Leton, T.G., (2018). Seasonal particulate pollution in port Harcourt Nigeria. *Journal of Environment Pollution and Human Health*, vol. 6, pp. 20-25. <http://pubs.sciepub.com/jephh/6/1/3/index.html>
- Alonso-Montesinos, J., Barbero, J., Polo, J., López, G., Ballestrín, J., & Batlles, F. J. (2017). Impact of a Saharan dust intrusion over southern Spain on DNI estimation with sky cameras. *Atmospheric Environment*, 170, 279-289. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231017306398>
- Alpízar Arteaga, Ernesto, & del Risco Sánchez, Arnaldo. (2012). Diseño de un Sensor de Flujo Vehicular basado en Lazo Inductivo. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 33(1), 33-44. Recuperado en 03 de noviembre de 2022, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282012000100004&lng=es&tlng=es.
- Arciniégas Suárez, César Augusto. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10. *Luna Azul*, (34), 195-213. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742012000100012&lng=en&tlng=es.

- Bravo, L. (2017). Determinación y caracterización de material particulado sedimentable en el casco urbano del cantón Portovelo. Cuenca, Ecuador
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/27760/1/Trabajo%20de%20titulaci%C3%B3n.pdf>
- Carrión Gutierrez, Julio César; Javier Junior Ayza Yupanqui. (2019). Monitoreo de Contaminantes Sólidos Sedimentables (CSS) de la Extracción de Agregados Minerales para la Construcción en la Cantera Arunta del Distrito de Gregorio Albarracín - Agosto 2019. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental. Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería. Universidad Privada de Tacna
<file:///C:/Users/WIN7/Downloads/Carri%C3%B3n-Gutierrez%20Ayza-Yupanqui.pdf>
- Celis, J.E., Morales, J.R., Zaror, C.A. y Carvacho, O.F., Contaminación del Aire Atmosférico por Material Particulado en una Ciudad Intermedia: El caso de Chillan (Chile), Información Tecnológica 18(3), 49-58 (2007).
- EPA - Environmental Protection Agency. Sampling of ambient air for total Suspended Particulate Matter (SPM) (1996). Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air, EPA/625/R-96/010A, 1996.
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=30005G9N.TXT>
- Echeverri, C., Maya G. Relación entre las partículas finas (PM_{2.5}) y respirables (PM₁₀) en la ciudad de Medellín. Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Medellín: 7(12), 23-42 (2008)
- Galvis, B., Rojas N. Relación entre PM_{2.5} y PM₁₀ en la ciudad de Bogotá. Acta Nova: 3(2), 336-353 (2006).
- Gioda, U. Pérez, Z. Rosa, and B. D. Jiménez-Vélez, "Particulate Matter (Pm 10 and Pm 2.5) From Different Areas of Puerto Rico", Fresenius Environ. Bull., vol. 16, N.º 8, pp. 861-868, 2007. <https://acortar.link/spc4jA>
- Gyan et al. (2005) "African dust clouds are associated with increased paediatric asthma accident and emergency admissions on the Caribbean island of Trinidad", Int. J. Biometeorol., vol. 49, n.º 6, pp. 371-376, 2005.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15692817/>
- Instituto Nacional de Ecología [fecha de consulta: 26 de octubre de 2020]. Disponible en:
<http://www.ine.gob.mx/component/content/article/73-dica/523-calairecont-criterio>
- López Villarrubia, Elena, García Pérez, M. Dolores, Peral Pérez, Nieves, Ballester Díez, Ferrán, Iñiguez Fernández, Carmen, & Pita Toledo, M. Luisa. (2008). Caracterización del ambiente atmosférico en Las Palmas de Gran Canaria y Santa Cruz de Tenerife: 2000 a 2004. Revista Española de Salud Pública, 82(5), 493-507.
http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-

