

ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA CALIDAD DEL AIRE DETERMINADO POR MATERIAL PARTICULADO PM_{10} Y $PM_{2,5}$ EN LIMA METROPOLITANA

SPATIAL AND TEMPORAL ANALYSIS OF THE AIR QUALITY DETERMINED BY PARTICULATE MATTER PM_{10} AND $PM_{2,5}$ IN METROPOLITAN LIMA

¹Sergio A. Pacsi Valdivia

Resumen

En el presente estudio se realizó un análisis de la variación temporal y espacial de la concentración del $PM_{2,5}$ y PM_{10} en Lima y el Callao. Se utilizaron datos de concentración de $PM_{2,5}$ y PM_{10} medidos y analizados por la DIGESA y el SENAMHI, a través de la red de monitoreo de calidad del aire de Lima Metropolitana, durante el periodo 2001 y 2014. Los resultados muestran que los promedios diarios de PM_{10} no sobrepasan los Estándares de Calidad del aire (ENCA) del Perú, sin embargo los promedios anuales de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en casi todas las estaciones de monitoreo, si superan significativamente el ENCA y las guías de la OMS. La variación multianual del PM_{10} y $PM_{2,5}$ muestran una tendencia descendente moderada para el PM_{10} y leve para el $PM_{2,5}$ sin embargo es necesario tomar medidas de control para evitar su incremento. Las zonas norte, sur y este de Lima presentan los mayores valores de PM_{10} y $PM_{2,5}$. Los valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para Lima Metropolitana, se encuentran en el rango de 0,50 (Lima norte) y 0,75 (Callao) con un promedio para la ciudad de 0,65.

Palabras claves: Análisis temporal y espacial, tendencias, calidad del aire, PM_{10} y $PM_{2,5}$.

Abstract

This research was carried out to show an analysis of the temporal and spatial variation of the $PM_{2,5}$ and PM_{10} in Lima and Callao. The $PM_{2,5}$ and PM_{10} concentration data measured and analyzed by DIGESA and SENAMHI are used, through the air quality monitoring network in Metropolitan Lima, during the period 2001 to 2014. The results show that the PM_{10} daily averages not exceed the Peruvian air quality standards (ENCA), however the $PM_{2,5}$ and PM_{10} annual averages in almost all the monitoring stations, they exceed significantly the ENCA and WHO's guidelines. $PM_{2,5}$ and PM_{10} multi-year variation shows a mild and moderate descending tendency, however it is necessary to take control measures to prevent their increase. The north, south and east areas of Lima presented the highest values of $PM_{2,5}$ and PM_{10} . The $PM_{2,5}/PM_{10}$ relationship values for Metropolitan Lima, are in the range of 0.50 (North Lima) and 0.75 (Callao), with an average for the city of 0.65.

Key words: Temporal and spatial analysis, tendency, air quality, PM_{10} and $PM_{2,5}$.

1. Introducción

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), más de la mitad de la población mundial reside en ciudades con índices de contaminación 2,5 veces mayores de los recomendados por este organismo (OMS, 2014). La OMS realizó un análisis de la calidad del aire por PM_{10} y $PM_{2,5}$ en 1.600 ciudades de 91 países, donde se concluye que en América Latina, la ciudad con peores indicadores de material particulado es Lima (OMS, 2014).

Según la Dirección General de Salud Ambiental de Lima (DIGESA), en un reciente estudio concluye que el principal contaminante es el material particulado, expresado como PM_{10} y $PM_{2,5}$. Ambas variables sobrepasan el Estándar Nacional de Calidad Ambiental del Aire del Perú (ENCA) en más del 333% en 25 distritos ubicados al Norte y Este de Lima Metropolitana y el Callao (DIGESA, 2012). Esta situación está asociada al acelerado desarrollo económico e industrial del Perú, que

ha traído como consecuencia el aumento de las emisiones de contaminantes atmosféricos de las fuentes vehiculares e industriales y como consecuencia el deterioro de la calidad del aire y la afectación a la salud de la población. Estudios epidemiológicos han demostrado una relación del efecto agudo entre las partículas en el aire y la morbilidad y mortalidad de la población (WHO, 2006). Las altas concentraciones de contaminación por partículas pequeñas y finas ($PM_{2,5}$) se asocian particularmente con un alto número de muertes por enfermedades del corazón y derrames cerebrales, así como con enfermedades respiratorias y cáncer (OMS, 2014). Para entender y mitigar el efecto de los contaminantes atmosféricos en la salud de la población, es importante tomar medidas para mejorar la calidad del aire, siendo una medida inicial y apropiada la medición y evaluación de los contaminantes criterio.

¹Departamento de Ingeniería Ambiental, Física y Meteorología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
Email: spv@lamolina.edu.pe

Por ello, actualmente el estado de la calidad del aire en Lima Metropolitana y el Callao, es monitoreada a través de la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) y del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). La base de datos que se ha generado permite la realización de estudios sobre las características generales de los contaminantes atmosféricos y su incorporación en los esquemas de gestión de calidad del aire en Lima Metropolitana y el Callao.

En consecuencia, tomando en consideración que el material particulado es una de las variables más importantes por sus altos niveles de concentración y sus efectos en la salud de la población en la Ciudad de Lima Metropolitana y el Callao, el presente estudio tiene como objetivo principal analizar la variación temporal (horario, mensual y multianual) y espacial de la concentración del material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ en Lima Metropolitana y el Callao, durante el periodo 2001- 2014.

2. Materiales y métodos

Actualmente Lima y el Callao constituyen la zona metropolitana más grande del Perú. De los 31,1 millones de habitantes del Perú, casi 9,8 millones forman parte de la capital (INEI, 2015). Esta zona metropolitana se ubica geográficamente entre las Latitudes $11^{\circ}45'$ y $12^{\circ}24'$ Sur y las Longitudes $76^{\circ}40'$ y $77^{\circ}10'$ Oeste y para estudios atmosféricos se han zonificado tres cuencas atmosféricas, denominadas como la Cuenca del Río Chillón, Cuenca del Río Rímac y la cuenca del Río Lurín (Valdivia, 2008). Actualmente el estado de la calidad del aire en Lima Metropolitana y el Callao, es monitoreada a través de dos instituciones. La primera, la Dirección General de

Salud Ambiental (DIGESA), perteneciente al Ministerio de Salud del Perú, que se encarga de la vigilancia de la calidad del aire en Lima Metropolitana y el Callao (progresivamente desde el año 1986) a través de 5 estaciones de monitoreo, donde se utiliza generalmente equipos manuales y semiautomáticos. Las características de estas estaciones se muestran en la Tabla 1. La instalación de todas las estaciones se ha realizado en los techos del primer piso de los Centros de salud y hospitales de la red asistencial del Ministerio de Salud. A partir del 2014 se ha implementado una nueva estación (Estación Lince) totalizando un total de seis estaciones (DIGESA, 2015).

La segunda institución es el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), perteneciente al Ministerio del Ambiente del Perú, que realiza la vigilancia de la meteorología y la calidad del aire en Lima Metropolitana y el Callao a través de nueve (9) estaciones de monitoreo. De esta red de monitoreo cinco estaciones (mostrados en la tabla 1) vienen operando desde el 2010 y sus datos se han utilizado para el presente estudio. Las otras cuatro estaciones se han implementado paulatinamente a partir del 2014. Las estaciones de la red operada por el SENAMHI se han instalado en edificios públicos, municipalidades y parques; y en todas las estaciones se utilizan equipos de monitoreo automáticos para gases y partículas (SENAMHI, 2015).

En la Fig. 1, se muestra la ubicación espacial de la red de monitoreo de calidad del aire de Lima Metropolitana y el Callao. La numeración de las estaciones se ha realizado según lo establecido en la Tabla 1.

Tabla 1. Características generales de la red de estaciones de monitoreo de calidad del aire de Lima Metropolitana y el Callao.

Zona de Lima	Nº	Nombre de Estación	Distrito	Operador	Latitud S	Longitud E	Tipo tránsito vehicular
Norte	1	Santa Luzmila	Comas	DI	8679051	275253	regular
Centro	2	Conaco	Cercado de Lima	DI	8667457	279413	alto
	3	Campo de Marte	Jesús María	SE	8664893	277601	regular
Sur	4	Hospital María A.	San Juan de Miraf.	DI	8654774	286834	regular
	5	San Borja	San Borja	SE	8661900	283200	regular
	6	Villa María	Villa María	SE	8654306	291077	regular
Este	7	Hospital H Unanue	El Agustino	DI	8668211	283190	alto
	8	Ate	Ate Vitarte	SE	8669823	291097	alto
	9	Santa Anita	Santa Anita	SE	8667937	285325	regular
Callao	10	Disa Callao	Bellavista	DI	8665730	270654	regular

DI: DIGESA SE: SENAMHI

Fuente: Elaboración propia

El muestreo y análisis del PM_{10} y $PM_{2.5}$ por la DIGESA se ha realizado a través de equipos manuales tipo High Vol y Mini Vol (DIGESA, 2015) y el SENAMHI utiliza el Monitor Automático TEOM serie 1400a de la marca Rupprecht & Patashnick (SENAMHI, 2015). Se obtuvieron los parámetros estadísticos descriptivos de los datos, a través del programa estadístico MINITAB TM

versión 11.0. Se calcularon los promedios horario, diario, mensual, estacional (verano, otoño, invierno y primavera) y anual de los datos de PM_{10} y $PM_{2.5}$ y se generaron series de tiempo para observar su comportamiento y las tendencias. Todos los resultados fueron comparados con los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del aire del Perú y las guías de calidad del aire de la OMS.

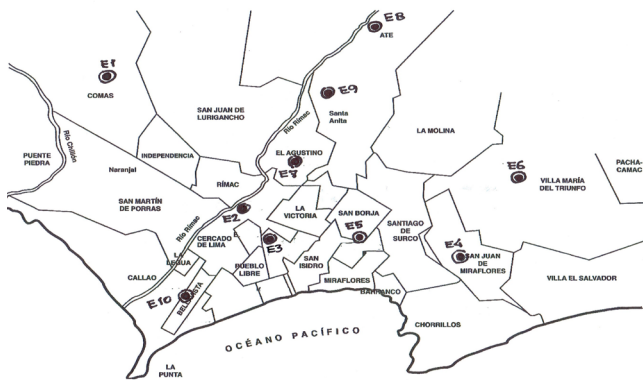


Figura 1. Ubicación espacial de la red de estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana y el Callao, operadas por el SENAMHI y la DIGESA.

3. Resultados y discusión

Variación horaria del PM_{10} en Lima

Para el estudio se utilizó una base de datos de promedios horarios de material particulado menor a 10 micras (PM_{10}) medidos en la red de calidad del aire del SENAMHI del Perú, para el periodo 20 de diciembre del 2011 al 20 de enero del 2014.

Se observa en la Fig. 2 la variación horaria estacional del PM_{10} para la estación Campo de Marte para el periodo diciembre 2011 y enero 2014. La variación horaria se caracteriza por presentar dos picos máximos durante el día, el primero a las 10:00 a.m. ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el segundo a las 10:00 p.m. ($52.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ambos asociados a las emisiones del parque automotor y las actividades antropogénicas del lugar. Los valores mínimos ocurren a las 5:00 am ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2:00 pm ($40.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) respectivamente y tienen probable relación a la disminución de las emisiones de las fuentes móviles. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios de diferentes ciudades (Echeverri, C. y Maya, G., 2005; García R. 2006; Ibañez, 2008; Pandey, 2012; Pires, 2012; Valdivia, 2008 y Zakey, 2008).

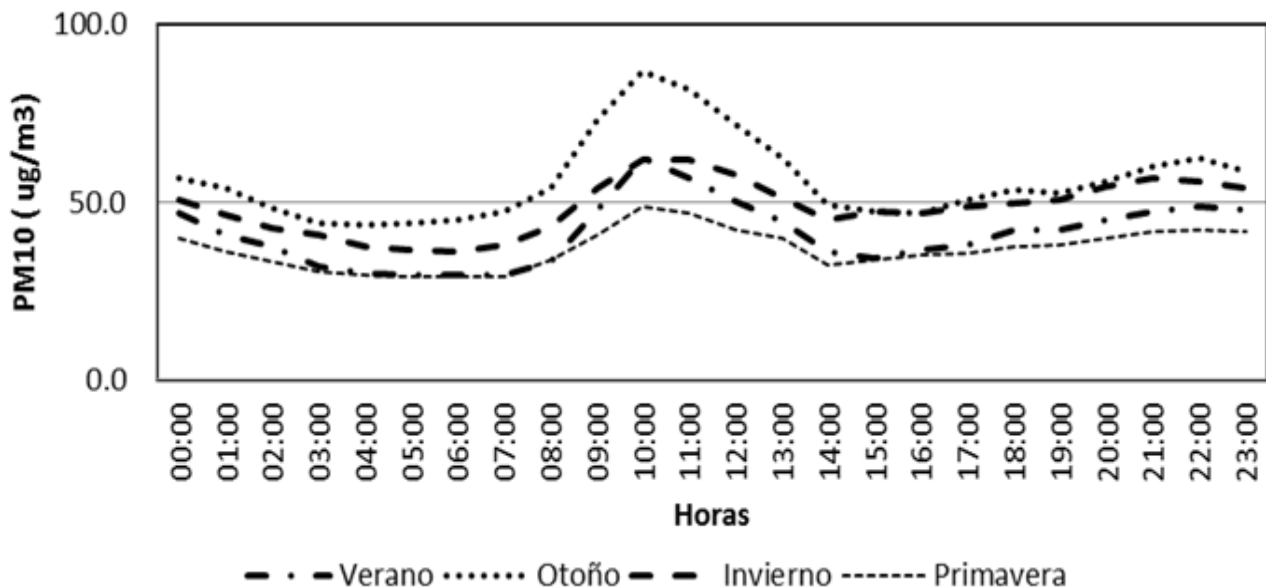


Figura 2. Variación horaria multianual y estacional del PM_{10} para la estación Campo de Marte. Periodo diciembre 2011-enero 2014.

Los mayores valores de concentración de PM_{10} se registraron durante el periodo de otoño austral (23 marzo - 22 junio) observándose un pico máximo de $86.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los mínimos valores se registran durante la primavera austral (23 setiembre - 22 diciembre), el cual tiene un pico máximo de $48.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta característica descrita muestra la influencia de la geografía y climatología local en la variación horaria del PM_{10} , puesto que en otros estudios (Pandey, 2012; Zakey, 2008) los máximos valores de PM_{10} a nivel horario se registraron en el periodo de verano y los mínimos en invierno.

En la Fig. 3 se muestra la variación diaria semanal para la estación Campo de Marte, promediados para el periodo

diciembre 2011 a enero 2014, y para los periodos de verano e invierno austral. Se observa que los valores de concentración de PM_{10} son mayores en el periodo de invierno que en el verano.

En el invierno, se observa que los mayores valores de concentración de PM_{10} se dan los días martes y viernes, mientras que durante el verano los máximos valores se dan los miércoles y sábados. Estos patrones se pueden asociar a los patrones de usos y costumbres de la población del distrito de Jesús María. En ambos periodos verano e invierno los mínimos valores se registran los días domingos, lo cual es coherente con la costumbre de la población de Lima, donde los domingos disminuyen las

actividades antropogénicas y flujo el transporte vehicular. Estos resultados son coherentes con los encontrados en otros estudios (García, 2006; Pandey, 2012).

Variación mensual y estacional del PM₁₀

En la Fig. 4 se muestra la variación mensual multianual del PM₁₀ para las diez estaciones de calidad del aire de Lima metropolitana y el Callao, operadas por el SENAMHI (periodo enero 2011-diciembre 2014) y por la DIGESA (periodo enero 2007-diciembre 2014). Las evaluaciones se han realizado en base a datos promedios mensuales emitidos por ambas instituciones (INEI, 2015a).

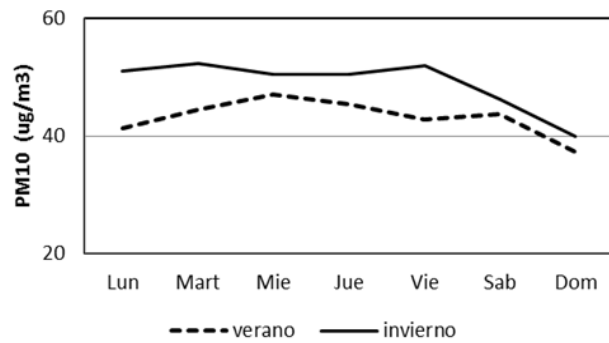


Figura 3. Variación diaria y semanal del PM₁₀ para la estación Campo de Marte. Periodo diciembre 2011-enero 2014

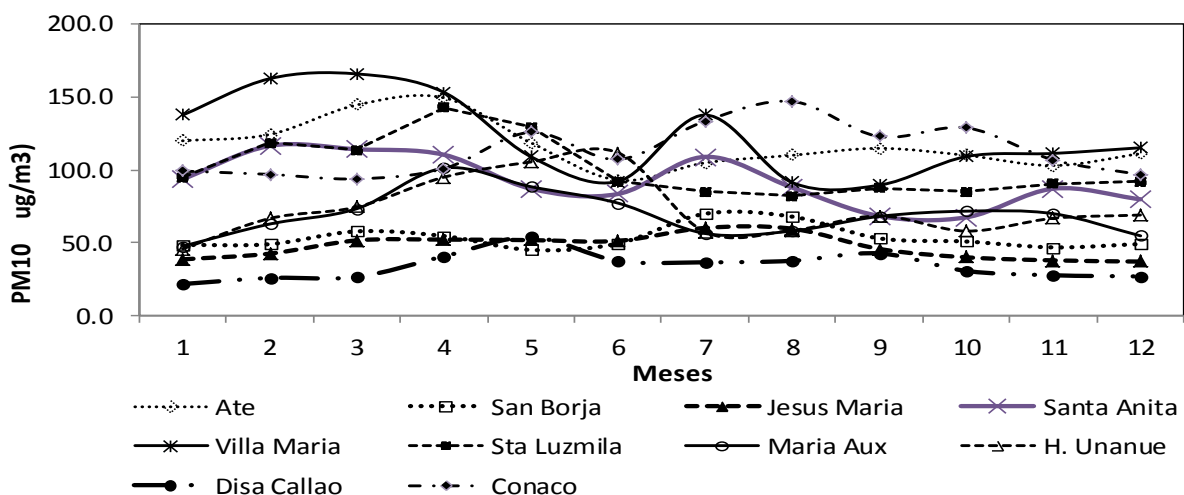


Figura 4. Variación mensual multianual del PM₁₀ para las estaciones de la red del SENAMHI (Periodo 2011- 2014) y la red de la DIGESA (periodo 2007-2014).

Se observa que las estaciones Villa María (Ubicado al sur de Lima) y Ate (ubicado al este de Lima) presentan los mayores valores de concentración de PM₁₀ durante los meses de verano, con valores que oscilan entre 120-165 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos resultados se asocian a la cercanía de vías de alto tránsito vehicular, las calles sin pavimentar y las condiciones meteorológicas de la zona.

Los mínimos valores se registran durante los meses del verano austral en las estaciones Callao (ubicado al oeste de Lima) y Campo de Marte (distrito de Jesús María, ubicado cerca al centro de Lima), con valores que oscilan entre los 22 - 52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En general en estas dos estaciones se registran los mínimos valores durante todo el año, que podrían estar asociados a las características urbanísticas y meteorológicas del lugar.

Se observa un rango de concentración de PM₁₀ de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre la estación Ate y Campo de Marte durante todo el año, evidenciando esto que las características geomorfológicas, urbanísticas y meteorológicas asociados a las fuentes de emisiones de material particulado de cada zona, determinan la variación temporal de la concentración de PM₁₀. Solamente en la estación Villa María se superan los estándares nacionales de calidad ambiental del aire del Perú (ENCA) para promedios de 24 horas que equivale a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual ocurre en los meses del verano austral.

En la Fig. 5 se muestra la variación estacional del PM₁₀ para las diez estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana y el Callao. Se observa que las concentraciones de PM₁₀ son mayores en las estaciones Villa María y Ate en los meses de verano y otoño, disminuyendo sus valores hasta los meses de invierno donde se registran sus mínimos valores. Esta característica está asociada a las condiciones de humedad ambiental que predominan en estos distritos (baja humedad en verano y alta en invierno) y las condiciones de terrenos y calles sin pavimentarse o con poca cobertura vegetal, factores que favorecen la dispersión de polvo fino de los suelos y su incorporación al aire ambiental (García, 2006; Ibáñez, 2008)).

Se observa una variación diferente y opuesta, en las estaciones de San Borja, Campo de Marte (Jesús María) y Callao, en los cuales los máximos valores de concentración de PM₁₀ se registran durante los meses de invierno y los mínimos valores de concentración de PM₁₀ en el verano o primavera. Esta condición refuerza las conclusiones de Ibañez (2008), en lo referido a la existencia de microclimas en los diferentes distritos de Lima, que influyen directamente en las condiciones de dispersión de los contaminantes atmosféricos y el nivel de la calidad del aire en Lima.

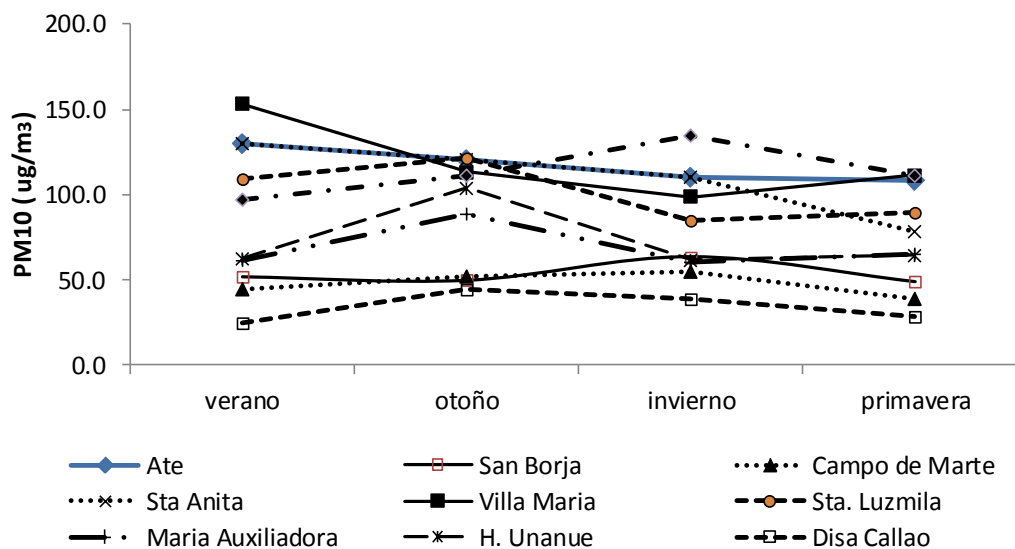


Figura 5. Variación estacional multianual del PM₁₀ para las estaciones de la red del SENAMHI (Periodo 2011- 2014) y la red de la DIGESA (periodo 2007-2014).

Variación multianual y tendencias del PM₁₀

En la Fig. 6 se muestra la variación temporal del promedio multianual de la concentración de PM₁₀ para las diez estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana y el Callao. Se incluye además la evaluación de la tendencia de la serie histórica promedio de PM₁₀ de toda la red de monitoreo. Se observa que los valores del PM₁₀ promedio anual de todas las estaciones de monitoreo, a excepción

del Callao, superan significativamente los valores límites del ENCA anual para PM₁₀ (50 µg/m³) y si tomamos en cuenta las guías de la OMS para PM₁₀ (20 µg/m³) todas las estaciones superan la normativa internacional. Este resultado confirma el anuncio de la OMS que indica que Lima es la ciudad con los peores niveles de calidad del aire por PM₁₀ en la región sudamericana (OMS, 2014).

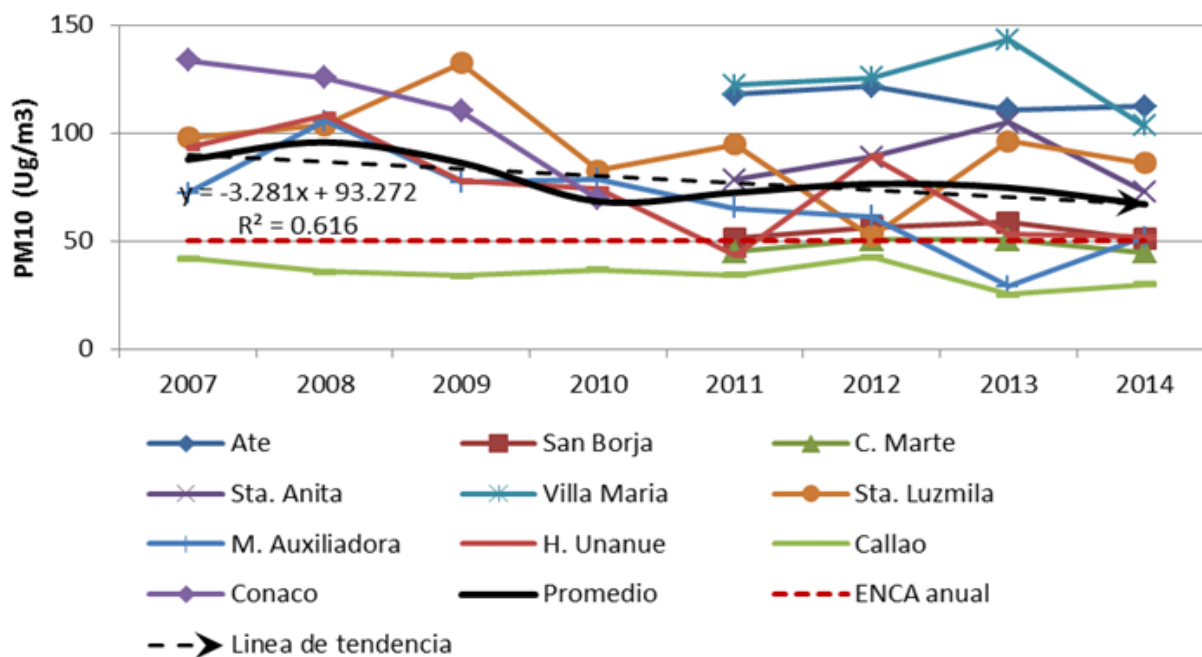


Figura 6. Variación del promedio anual del PM₁₀ para las estaciones de la red de calidad del aire de Lima y el callao. Periodo 2007- 2014

Las estaciones con mayores valores de PM_{10} son Villa María (Lima sur), Ate (Lima este) y Santa Luzmila (Lima Norte). Esta condición se asocia a las altas emisiones vehiculares y polvo atmosférico natural del entorno de las estaciones de monitoreo. La estación Callao presenta los mínimos valores de PM_{10} durante todos los años y nunca supera en ENCA nacional, mientras que la estación campo de Marte (Lima Centro) se encuentra con valores muy cercanos al ENCA. Ambos casos se asocian a la mayor dispersión de los contaminantes por el viento y al regular tránsito vehicular en la zona.

El análisis de tendencias de la serie histórica muestra que existe una disminución moderada (coeficiente de determinación de 0,616) de los niveles de PM_{10} en casi todas las estaciones de monitoreo durante el periodo de estudio. Sin embargo los niveles siguen siendo superiores al ENCA de PM_{10} . Esta disminución se explica por la implementación progresiva de medidas de control y gestión de calidad del aire por las distintas entidades gubernamentales en los últimos cinco años: fomento al cambio de matriz energética a GNV y GLP del parque automotor de Lima, la implementación del Gashol y la implementación de corredores viales y el tren eléctrico.

Variación mensual y estacional del $PM_{2,5}$

En la Fig. 7 se muestra la variación mensual multianual del $PM_{2,5}$ para las cinco estaciones de calidad del aire de Lima metropolitana y el Callao, operadas por la DIGESA y que vienen operando desde el 2001.

Se observa en la Fig. 7, que la estación CONACO (centro de Lima) es la que presenta los mayores valores de $PM_{2,5}$ durante todo el año, con un pico máximo durante mayo y junio, y un pico mínimo durante el mes de enero. La variación mensual es similar en el resto de estaciones de calidad del aire y se explica por las condiciones meteorológicas predominantes de estabilidad atmosférica (mayo y junio) e inestabilidad atmosférica y turbulencia en los meses de verano (Ibáñez, 2008). Sin embargo, la experiencia internacional muestra que los altos niveles de $PM_{2,5}$ están asociados básicamente a las emisiones vehiculares (Quijano, 2005; Zakey, 2008; Cuzack et al, 2012).

La estación Callao es la que presenta los menores valores de $PM_{2,5}$ en relación al resto de estaciones y presenta sus máximos valores en otoño y los mínimos en verano, condiciones que se asocian a la mayor velocidad del viento en esa zona y los procesos de dispersión de contaminantes (Ibáñez, 2008).

Variación multianual y tendencias del $PM_{2,5}$

En la Fig. 8 se muestra la variación estacional del $PM_{2,5}$ para las cinco estaciones de calidad del aire de Lima metropolitana y el Callao, operadas por la DIGESA, y que vienen operando desde el año 2001. Se evidencia que todas estaciones de monitoreo presentan sus máximos valores en la época de otoño y los mínimos en el verano.

Comparando los valores medidos con lo que establece en ENCA nacional para $PM_{2,5}$ ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se observa que todas las estaciones de monitoreo sobrepasan significativamente la norma en mención, salvo el Callao durante primavera y verano.

En la Figura 9 se muestra la variación temporal del promedio multianual de la concentración de $PM_{2,5}$ para las cinco estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana y el Callao, operadas por la DIGESA (periodo enero 2001- diciembre 2014). Se incluye además la evaluación de la tendencia de la serie histórica promedio de $PM_{2,5}$ de toda la red de monitoreo. Se observa en la misma Fig. 9, que los valores del $PM_{2,5}$ promedio anual de todas las estaciones de monitoreo, superan significativamente los valores límites de la guía de la OMS para $PM_{2,5}$ ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el estándar de la EPA para $PM_{2,5}$ ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Este resultado confirma el anuncio de la OMS que indica que Lima es la ciudad con los peores niveles de calidad del aire por $PM_{2,5}$ en la región sudamericana (OMS, 2014).

En todas las estaciones de la red de monitoreo, se observa un incremento de la concentraciones de $PM_{2,5}$ desde el año 2001 hasta el 2006, fecha donde se registran los mayores valores de $PM_{2,5}$ que se dan en las estaciones CONACO (Lima centro), Santa Luzmila (Lima norte) y Hipólito Unanue (Lima este). Esta condición se asocia a las emisiones vehiculares del parque automotor obsoleto, al uso de diésel con altos niveles de azufre y la falta de un sistema de control y de revisiones técnicas. A partir del año 2006 se observa un proceso de disminución drástico y muy significativo de las concentraciones de $PM_{2,5}$ en todas las estaciones de monitoreo hasta el año 2010 en promedio. Esta disminución no es casual, sino el producto de la implementación de las medidas de control y gestión de calidad del aire por las distintas entidades gubernamentales, tales como la implementación de los estándares de calidad ambiental del aire (ECAS) para los contaminantes criterio y la aprobación de los límites máximos permisibles para las emisiones vehiculares en el año 2001, el retiro del plomo de la gasolina de 84 octanos, la reducción del contenido de azufre del diésel, entre otras medidas (Ibáñez, 2008; Valdivia, 2008).

A partir del 2010, se observa que la tendencia descendente se detiene y en algunas estaciones se observa que los niveles de $PM_{2,5}$ se incrementan, como es el caso de la estación Santa Luzmila (Comas). Esta condición indica que las medidas adoptadas a inicios de los años 2000 fueron muy importantes, sin embargo existe una tasa de ingreso de vehículos nuevos y usados que han hecho que el parque automotor se incremente significativamente y con ello se han incrementado también las emisiones vehiculares y el deterioro de la calidad del aire (SENAMHI, 2015). El análisis de tendencias de la serie histórica muestra que existe en general una disminución leve de los niveles de $PM_{2,5}$ en casi todas las estaciones de monitoreo, fundamentado en el análisis del coeficiente de determinación que es de 0.28.

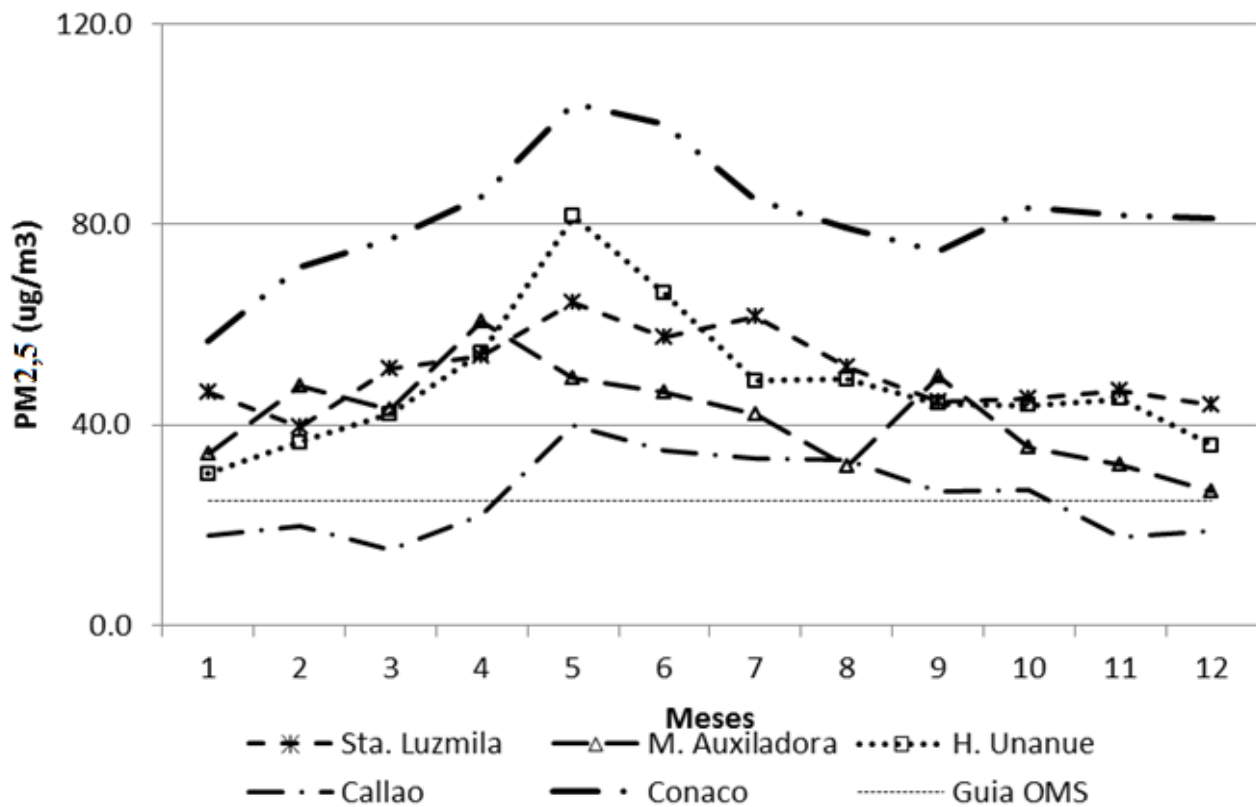


Figura 7. Variación del promedio mensual del $PM_{2,5}$ para las estaciones de la red de calidad del aire de Lima metropolitana y el callao. Periodo 2001- 2014.

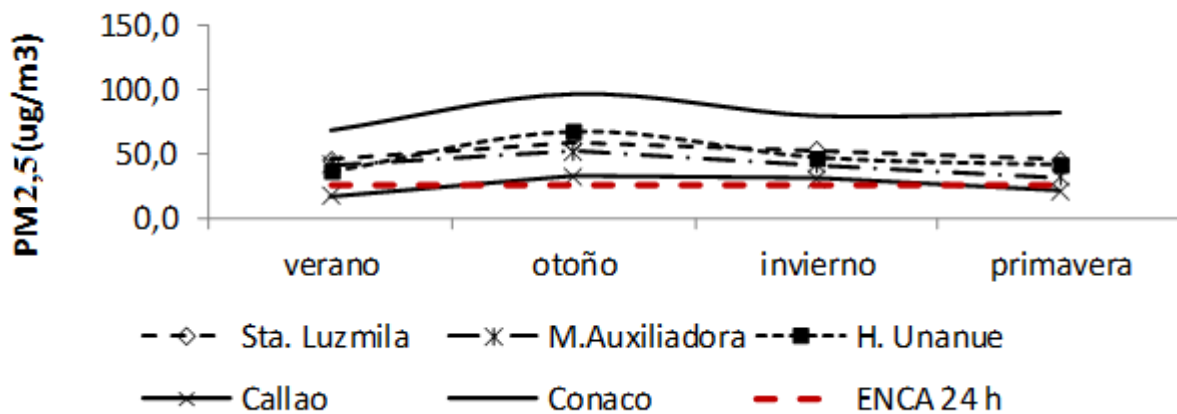


Figura 8. Variación estacional del $PM_{2,5}$ para las estaciones de la red de calidad del aire de Lima metropolitana y el Callao. Periodo 2001- 2014.

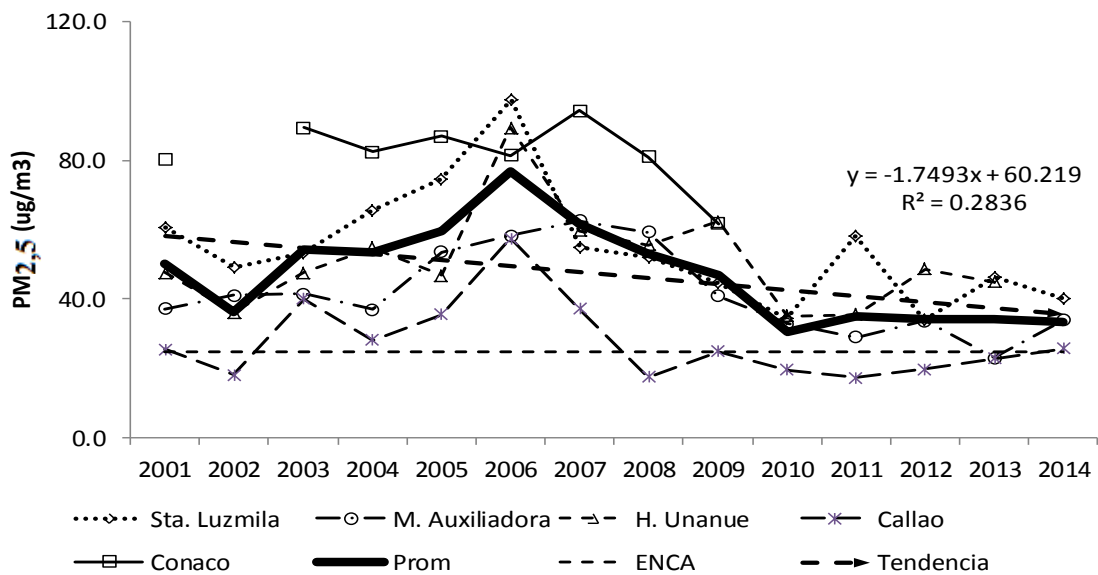


Figura 9. Variación multianual del $PM_{2.5}$ para las estaciones de la red de calidad del aire de Lima y el Callao, operados por la DIGESA. Periodo 2001- 2014

Relación entre el $PM_{2.5}$ y el PM_{10} en Lima Metropolitana

En la Fig. 10 se muestra la variación temporal del promedio mensual de la concentración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} para la estación Conaco y Callao. Se observa que las tendencias mensuales de ambas variables son casi similares durante el año, con excepción de agosto y setiembre. Se observa un rango anual promedio del PM_{10} en relación al $PM_{2.5}$ mucho mayor en la estación Conaco ($31.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que en la estación Callao ($8,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), siendo evidente que las fuentes de emisión y características meteorológicas en ambas estaciones son diferentes.

La relación entre el $PM_{2.5}$ y el PM_{10} representa la cantidad de material fino, casi todo de origen antrópico, y el total de partículas menores a diez micras presentes en el aire ambiental (Galvis et al, 2006). La relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ ha sido determinada por numerosos estudios llevados a cabo en diferentes ciudades del mundo. En la Tabla 3 se muestra los resultados de la relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ para las estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana operadas por la DIGESA y a modo comparativo se incluye resultados de otras ciudades, según referencias bibliográficas.

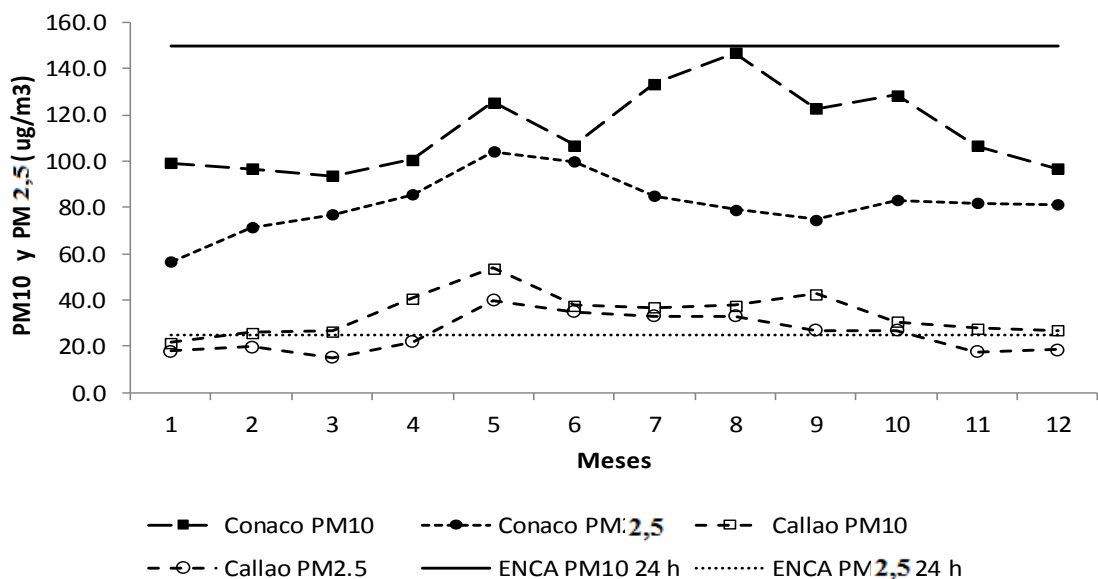


Figura 10. Variación mensual de la concentración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} para la estación Conaco (Lima centro) y Callao (periodo enero 2001- diciembre 2014).

Tabla 3. Relaciones $PM_{2,5}/PM_{10}$ para Lima Metropolitana y otras ciudades

País	Ciudad/zona	Estación	$PM_{2,5}/PM_{10}$
Perú	Lima norte	Santa Luzmila	0,50
	Lima sur	María Auxiliadora	0,60
	Lima este	Hipólito Unanue	0,66
	Lima centro	Conaco	0,75
	Callao	Callao	0,72
			Promedio de Lima
Colombia*	Bogotá		0,60
México*	México DF		0,50 -0,70
Chile*	Santiago		0,40 -0,60
Inglaterra*	Birmingham		0,50 -0,80
España*	Barcelona		0,60

Fuente: *Pandey et al (2012) y Galvis et al (2006)

En términos generales los valores de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ para Lima Metropolitana, se encuentran en el rango de 0,50 (Lima norte) y 0,75 (Callao) con un promedio

para la ciudad de 0,65. Estos valores son muy similares a los encontrados para otras ciudades de Latinoamérica y Europa (Pandey *et al*, 2012 ; Galvis et al, 2006).

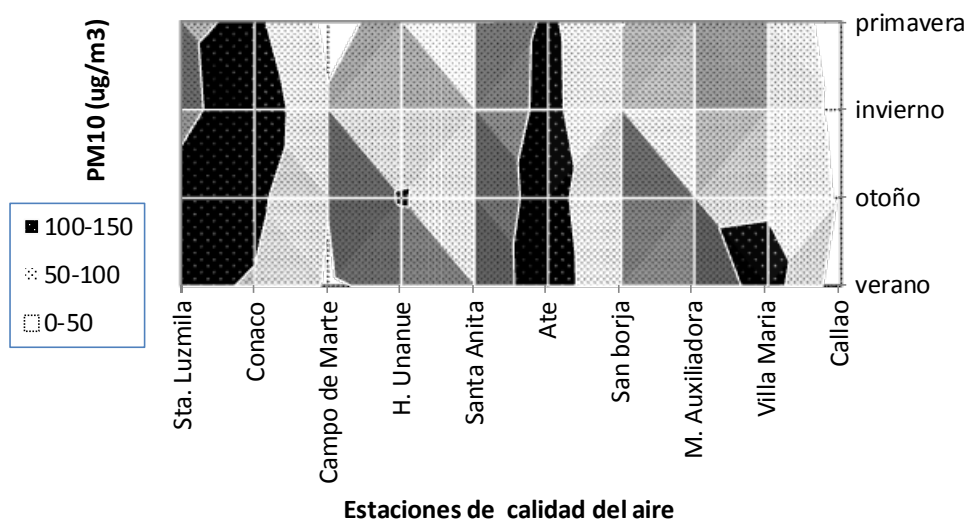


Figura 11. Variación espacial del PM_{10} en Lima Metropolitana y el Callao.

Variación espacial del $PM_{2,5}$ y PM_{10}

En la Fig. 11 se muestra la variación espacial del promedio multianual de la concentración de PM_{10} para las diez estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana y el Callao. Se observa que en todas las zonas de Lima Metropolitana se superan el ENCA anual para PM_{10} y específicamente las zonas de Lima este (Ate vitarte), Lima Norte (Comas) y Lima centro (Conaco), son las áreas donde se registran los mayores valores de PM_{10} durante todo el año, con concentraciones superiores a $100 \mu g/m^3$. Por otro lado, toda la zona cercana a Bellavista (Callao) son las áreas donde se registran los menores valores de PM_{10} y en ningún mes del año se superan el ENCA correspondiente para PM_{10} .

En la Fig. 12 se muestra la variación espacial del promedio multianual de la concentración del $PM_{2,5}$ para las cinco estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana y el Callao, operadas por la DIGESA (periodo enero 2001-diciembre 2014). Se observa que todas las zonas de Lima Metropolitana superan la guía de la OMS que es de $10 \mu g/m^3$. Sin embargo la zona de Lima centro (Conaco) presenta los mayores valores de concentración durante todo el año, seguido por Lima norte (Santa Luzmila) que presenta mayores valores en otoño e invierno. La zona con menores valores de concentración de $PM_{2,5}$ se encuentran en el Callao.

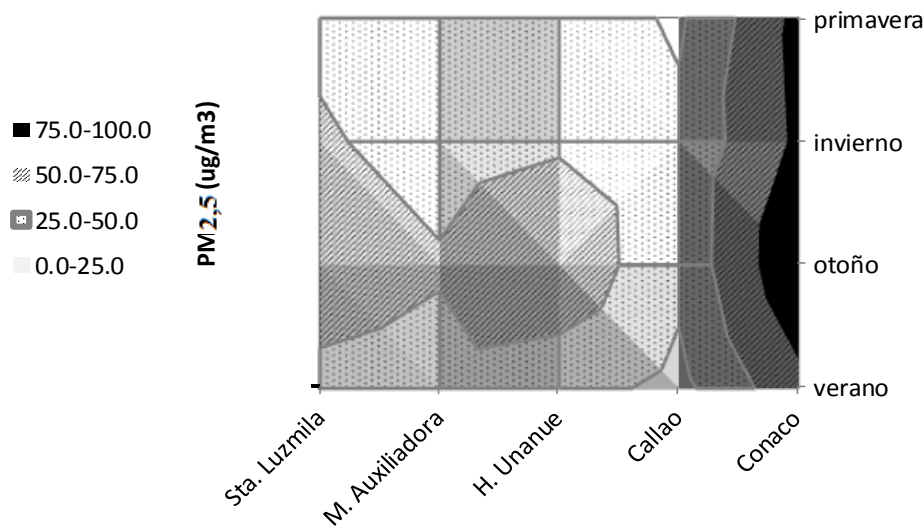


Figura 12. Variación espacial del $PM_{2,5}$ en Lima Metropolitana y el Callao.

4. Conclusiones

La variación horaria del PM_{10} en Lima presenta dos picos máximos durante el día (10:00 a.m. y 10:00 p.m.) y dos picos mínimos (5:00 a.m. y 2:00 p.m.). Estacionalmente en el otoño los valores de PM_{10} son máximos y mínimos durante la primavera austral. A nivel diario los máximos valores se registran los martes y viernes y los mínimos valores los días domingos. A nivel mensual los mayores valores de PM_{10} se registran durante el otoño en las zonas sur y este de Lima y los mínimos en el Callao. La variación multianual del PM_{10} muestra que todas las estaciones de monitoreo, a excepción del Callao, superan significativamente los valores límites del ENCA para PM_{10} ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Existe una disminución moderada de los niveles de PM_{10} en casi todas las estaciones de monitoreo, fundamentado en el análisis del coeficiente de determinación que es de 0.616.

La variación mensual del $PM_{2,5}$ presenta los mayores valores durante el otoño y los mínimos durante el verano. Todas las estaciones de monitoreo de calidad del aire de Lima Metropolitana superan las guías y estándares internacionales de la USEPA y OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). La tendencias de la serie histórica de $PM_{2,5}$ muestra que existe en general una disminución leve de sus concentraciones en casi todas las estaciones de monitoreo.

El rango anual promedio del PM_{10} y $PM_{2,5}$ es mayor en el centro de Lima y menor en el Callao. La relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ es de 0,65 en promedio para la ciudad de Lima.

5. Agradecimientos

El autor agradece a la Universidad Nacional Agraria La Molina, por el financiamiento para la realización del presente estudio y al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), por habernos facilitado y autorizado el uso de los datos horarios de PM_{10} de su red de monitoreo de calidad del aire de Lima metropolitana.

6. Literatura citada

- Cusack, M. et al., 2012.** Trends of particulate matter ($PM_{2.5}$) and chemical composition at a regional background site in the Western Mediterranean over the last nine years (2002–2010). *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 12, 10995–11033, 2012.
- DIGESA. 2012.** II Estudio de saturación de Lima Metropolitana y el Callao 2011 (en Línea). Disponible en http://www.digesa.minsa.gob.pe/depa/informes_tecnicos/Estudio%20de%20Saturacion%202012.pdf. Consultado 3 febrero del 2015.
- DIGESA. 2015.** Programa Nacional de Vigilancia Sanitaria de Calidad del Aire (en línea). Disponible en http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/aire_lc/lima_callao.asp. Consultado 3 de febrero 2015.
- Echeverri, C. y Maya, G. 2005.** Relación entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} y Respirables (PM_{10}), en la ciudad de Medellín. En: *Revista de Ingeniería, Universidad de Medellín*. N° 15, Medellín.
- Galvis, B. et al. 2006.** Relación entre $PM_{2,5}$ y PM_{10} en la ciudad de Bogotá. *ACTA NOVA*; Vol. 3, N° 2, junio 2006, 336 -351.
- García, R. y Francisco. 2006.** Distribución espacial y temporal de la concentración de material particulado en Santa Marta, Colombia, *Revista de la Facultad Nacional de Salud Pública*, Vol. 24, Núm. 2, pp 73-82.
- Ibañez, L. 2008.** Comparación entre las metodologías de muestreo equivalentes y de referencia del material particulado atmosférico, en la ciudad de Lima. (Tesis de Pre grado en Ing. Ambiental). Lima: Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). 2015.** Estadísticas de población y vivienda (en Línea). Disponible en <http://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/poblacion-y-vivienda/>. Consultado el 4 de febrero del 2015.

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).

2015a. Perú: Anuario de estadísticas Ambientales 2014 (en Línea). Disponible en http://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1197/index.html . Consultado el 5 de febrero del 2015.

OMS, 2014. La calidad del aire se está deteriorando en muchas de las ciudades del mundo. 7 mayo 2014. (en línea). Disponible en http://www.paho.org/hq/index.php?id=9558%3Aair-quality-is-deteriorating-in-many-of-the-worlds-cities&option=com_content . Consultado 4 feb. 2015.

Pandey, P. et al. 2012. Seasonal Trends of PM_{2.5} and PM₁₀ in Ambient Air and Their Correlation in Ambient Air of Lucknow City, India. Bull. Environ. Contam. Toxicol. (2012) 88:265–270.

Pires, J. & Martins, F. 2012. Evaluation of Spatial Variability of PM₁₀ Concentrations in London. Water Air Soil Pollut (2012) 223:2287–2296.

Quijano, A., Orozco, M. 2005. “Monitoreo del material particulado-fracción respirable PM_{2.5} en Pamplona (Colombia)” Bistua Vol III.

SENAMHI. 2015. Boletín Vigilancia de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de Lima y Callao. Boletín Mensual. Año 15 - N°01, ENERO 2015 (en línea). Disponible en <http://www.senamhi.gob.pe/load/file/03201SENA31012015.pdf> . Consultado el 4 de febrero del 2015.

Valdivia, N. 2008. Análisis comparativo de dos métodos de muestreo para determinar la concentración de partículas menores a 10 micras (PM₁₀) en los exteriores del congreso de la república. (Tesis de Pre grado en Ing. Ambiental). Lima: Universidad Nacional Agraria la Molina.

Who, 2006. Air quality Guidelines, global update 2005: Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide. Report on a WHO Working Group. Bonn, Germany. January 2006.

Zakey, A. 2008. Seasonal and spatial variation of atmospheric particulate matter in a developing megacity, the Greater Cairo, Egypt, Cairo University, Department of Meteorology, Faculty of Science, Cairo, Egypt, Vol. 21(2), pp 171-189.