

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE EL COMPORTAMIENTO ESTACIONAL DE LOS CONTAMINANTES SÓLIDOS SEDIMENTABLES CON LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS PREDOMINANTES EN LA ZONA METROPOLITANA DE LIMA-CALLAO DURANTE EL AÑO 2004

José Silva Cotrina (1)
Zarela Montoya Cabrera (2)

ABSTRACT

Using data of atmospheric pollution dust registered in a network of 24 sample points, suitably distributed into the atmospheric basin of Lima-Callao Metropolitan Area and spatially analyzed related to the diary and annual meteorological and climatic cycle registered throughout the four season periods of 2004 in the Jorge Chavez Airport weather and radiosondaje station; three persistent cells or critical zones can be showed with nucleus values of 37,7; 22,6 and 25 t/km²/month for february (summer), 30,3; 17,5; and 25 t/km²/month for april (fall), 20,7; 18,3 and 25,5 t/km²/month for august (winter) and 23,0; 29,0 and 25,5 t/km²/month for september (spring). The behavior described is in close relation with the variations of height of the subsidence thermal inversion layer base throughout the year, which in summer is in 669 m and the air pollution get worse, while in winter is in 848 m and the air quality relatively get better. Moderate winds of the SSW in the marines breeze form that disperses to the polluting agents cleaning the air of the coastal strip and at the same time accelerate the suspension and re-suspension process, were observed with a frequency of 27% in summer and 19% in winter in the critical zones in which it has been registered the greater

I. Generalidades

El gobierno del Perú, es consciente que el crecimiento y desarrollo socioeconómico del país, está ocasionando desequilibrios ambientales en muchos de sus ecosistemas. En este sentido, crea en 1994 el Consejo Nacional del Ambiente, para coordinar las actividades ambientales a nivel nacional, regional y local que realizan los diferentes Sectores y niveles del Gobierno, entidades y empresas privadas y la comunidad civil organizada.

Para la gestión de la calidad del aire de la Zona Metropolitana de Lima-Callao, se creó por Resolución Suprema N° 768-98-PCM del 31 de diciembre de 1998, el Comité de Gestión de la Iniciativa de Aire Limpio para Lima y Callao, integrado por representantes de los diferentes Sectores del gobierno central, los gobiernos locales de Lima y Callao, y representantes de la empresa privada.

La labor interinstitucional coordinada, tanto por el CONAM como por el Comité, ha permitido concentrar y generar importante información que revela que la población de la Zona Metropolitana de Lima-Callao experimentó un crecimiento desde 0,6 Millones en 1940 a 8,2 Millones (30,7% del total nacional, según cifras proyectadas de INEI^(1,2). Asimismo, en cuanto a las actividades socioeconómicas, en especial el parque industrial cuenta con 18, 914 industrias (68% del total nacional)⁽²⁾ el parque automotor al 30 de junio 2004 con 851,050 vehículos (65,1% del total nacional)⁽³⁾. Además, el centralismo y los altos índices de desocupación y subempleo, como los mayores propulsores

de la inmigración a la capital, han dado paso a una alta actividad comercial formal e informal.

La diagnosis de la actividad antropogénica descrita, relacionada a los factores naturales climáticas de permanente aridez de la costa peruana donde se ubica geográficamente la capital, han ocasionado que la calidad del aire, se haya convertido en uno de los mayores riesgos para la salud de la población de la Zona Metropolitana de Lima y Callao^(4,5,6,7,8). Así, la primera de las 10 causas de atención hospitalaria en Lima-Callao, corresponde a las infecciones respiratorias agudas⁽⁹⁾. Se ha establecido que la contaminación por partículas aún en mínimas concentraciones causa a corto y largo plazo, disminución de la función pulmonar, lo que ocasiona la presencia de enfermedades crónicas respiratorias y la muerte prematura⁽¹⁰⁾.

Dependiendo de su tamaño, las partículas pueden sedimentar o flotar. Los contaminantes sólidos sedimentables, polvo atmosférico o deposición ácida seca incluyen al grupo de partículas de hasta un diámetro de aproximadamente 100 μ , considerando que el polvo de mayor tamaño tiende a sedimentar rápidamente⁽¹¹⁾; de este grupo, las partículas más finas, son las más peligrosas ya que tienen una mayor penetración en el sistema respiratorio⁽¹⁰⁾. Abundantes trabajos de investigación demuestran la relación directa entre el polvo atmosférico y partículas respirables con enfermedades respiratorias, digestivas, dermatológicas, reumáticas, nerviosas y oculares^(4,7).

(1) Ingeniero Meteorólogo. Director de Proyectos de Desarrollo y Medio Ambiente de la DGIA, SENAMHI.

(2) Bach. en Ingeniería Ambiental. Profesional de la DGIA, SENAMHI.

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología- SENAMHI- a través de su Dirección General de Investigación y Asuntos Ambientales, mediante su Programa de Vigilancia de la Contaminación Ambiental en la Zona Metropolitana (Z.M.) de Lima-Callao, viene evaluando los niveles de contaminación en los diferentes distritos de la capital; para ello cuenta con una red de muestreo de los contaminantes sólidos sedimentables (CSS), una estación automática de Calidad del Aire para la evaluación de los contaminantes gaseosos (Dióxido de Azufre, Monóxido de Carbono, Ozono Troposférico y Óxidos de Nitrógeno) y una estación meteorológica automática.

El presente artículo tratará específicamente el comportamiento estacional de los contaminantes sólidos sedimentables en la Z.M. de Lima-Callao durante el año 2004 y su interacción con las condiciones meteorológicas responsables de los procesos de transporte y dispersión de los contaminantes.

II. Área de estudio y climatología

El área de estudio comprende el ámbito de la Cuenca Atmosférica de la Z.M. de Lima-Callao, área delimitada por los obstáculos topográficos de origen natural, que modifican la circulación general de la atmósfera sobre la superficie (capa límite de la atmósfera), dando lugar a la formación de los vientos locales, diferentes del flujo de la atmósfera libre. Este tipo de vientos determina el transporte de las masas de aire dentro de la región y por lo tanto son responsables del transporte y de los procesos de dispersión (o de acumulación) de los contaminantes del aire (1,6,12).

El clima de la cuenca, como consecuencia de la interacción de tres factores climáticos semi-permanentes a). El Anticiclón del Océano Pacífico Suroriental b). La Cordillera de los Andes y c). La Corriente del Humboldt, es de permanente aridez debido a lo siguiente (1,4,5,6,8).

-Fenómeno de inversión térmica por subsidencia de masas de aire del Anticiclón del Pacífico Sur Oriental, que se forma durante todo el año en los niveles bajos de la troposfera de la costa, por lo general con menor altitud, espesor e intensidad durante

los meses de verano (base a 255 m.s.n.m. y tope a 596 msnm), y evoluciona hasta alcanzar su mayor altitud, espesor e intensidad al final del invierno (base a 675 m.s.n.m. y tope a 1490 m.s.n.m. e intensidad de 5°C).

-Temperatura media anual multianual, durante el verano, en las zonas cercanas a la costa, oscila entre 20,2 a 25,8°C y entre 19,8 a 28,2°C en los distritos del este. En el invierno varía entre los 15,5 a 18,3°C en la zonas cercanas a la costa y entre 13,1 a 18,6°C en los distritos del este.

-Precipitación media mensual multianual que varía desde 10 mm/año cerca de la línea costera a 40 mm/año en los distritos del este.

-Velocidad del viento superficial varía entre 3 y 5 m/s con 4 a 8% de calmas, de direcciones S, SSO y SSE en la zona costera; en la parte central el viento varía entre 2 y 4 m/s, de direcciones SSO y OSO, con calmas entre 21 a 42%; y en el lado oriental el viento varía entre 3 y 5 m/s, de direcciones O, SSO y OSO con calmas en un porcentaje de 20 y 40%.

Todo ello determina que los procesos de transporte y dispersión de los contaminantes tenga características particulares para el área de estudio.

III. Metodología

Para el análisis de los contaminantes sólidos sedimentables (CSS) se han empleado los datos de las 24 estaciones de muestreo instaladas en la Zona Metropolitana de Lima-Callao. Ver **figura 1**. Estos valores han sido comparados con el límite referencial establecido por la Organización Mundial de la Salud equivalente a 5t/km²/mes. Se han evaluado los valores promedio, los máximos, mínimos y se ha explicado su interrelación con las condiciones meteorológicas observadas.

Con respecto al análisis del comportamiento diario y horario de la componente meteorológica para la Zona Metropolitana de Lima y Callao, se ha utilizado la información proveniente de la estación automática y de radiosondaje A.I. Jorge Chávez para cada estación del año, analizándose la variación temporal de las variables Temperatura y Humedad Relativa máxima y mínima, viento y los sondajes atmosféricos para evaluar la altura de la

base de la inversión térmica en las 4 estaciones del año 2004.

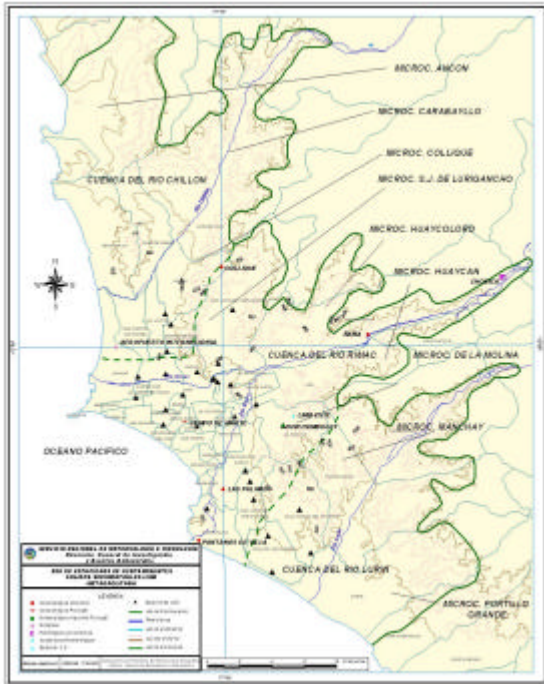


Fig.1. Red de muestreo de CSS v estaciones meteorológicas.

(Microcuencas atmosféricas del Rímac y San Juan de Lurigancho) que abarcan los distritos de El Cercado (extremo este), El Agustino, San Juan de Lurigancho, Lurigancho, Chaclacayo, Ate Vitarte y Santa Anita; y el centro del cono sur (Microcuencia atmosférica del río Turín y zona de Intercuenca Lurín-Rímac) que se extiende hacia Villa María del Triunfo, Villa El Salvador, San Juan de Miraflores y Pachacamac cuyas concentraciones varían mes a mes en respuesta a los procesos meteorológicos de transporte y dispersión y a la mayor o menor intensidad de los aportes locales.

Como se puede observar en el **cuadro 1**, el mayor número de estaciones (81%) que superan el límite referencial de 5 t/km²/mes de la OMS, corresponde al verano y el mínimo (62%) al invierno. Asimismo, considerando las 24 estaciones que componen la red de muestreo, la Zona Metropolitana de Lima-Callao, soporta en promedio mayores niveles de contaminación en el verano (11,02 t/km²/mes) y los mínimos (8,79 t/km²/mes) en el invierno.

Cuadro 1. : Valores Máximos registrados de contaminantes Sólidos Sedimentables durante cada estación del año 2004 en las zonas críticas de Lima-Callao.

Estación del año	% Estaciones Muestreo que superan el LMP	Cono Norte (t/km ² /mes)	Cono C- Este (t/km ² /mes)	Cono Sur (t/km ² /mes)	
Verano (Feb.)	81,0	37,7	22,6	25,0	
Otoño (Abr)	65,0	30,6	17,5	25,0	
Invierno (Ago)	62,0	20,7	18,3	25,0	Asim
Primavera (Nov)	78,0	23,0	29,0	25,5	ismo

IV. Resultados y discusiones

4.1 Análisis de los contaminantes sólidos sedimentables:

En la Zona Metropolitana de Lima-Callao, los principales centros de acumulación de los contaminantes sólidos sedimentables (polvo atmosférico) a lo largo de las 4 estaciones del año son los conos norte, centro-este y sur. El centro del cono norte (microcuencia atmosférica del río Chillón) comprende los distritos de Comas, Independencia, Los Olivos, San Martín de Porras, ventanilla, Pte. Piedra, Sta.Rosa, Ancón y Carabaylo; el del centro-este

entraciones se encuentran en el rango de 37,5 t/km²/mes (distrito de Comas) a 3,67 t/km²/mes (distrito de Bellavista).

Lo descrito está en estrecha relación con la altura media de la base de la Capa de Inversión Térmica por subsidencia, tal como ha sido descrito anteriormente, es menor en el verano, lo cual limita los procesos de dispersión, comparado con las condiciones que se presentaron en el invierno donde la base de la inversión está a mayor altitud.

A continuación, se describe el comportamiento del polvo atmosférico para las estaciones del año.

a. Estación de verano (febrero):

Durante el mes de febrero, mes representativo de la estación de verano, el núcleo del cono cono norte se encuentra en el distrito de Comas, con el valor más alto del mes equivalente a 37,7 t/km²/mes. El segundo centro (cono centro-este) tuvo su núcleo en el distrito de El Agustino, con una concentración de 22,6 t/km²/mes. Mientras que el tercer centro ubicado en el cono sur, se situó cerca al límite de los distritos de Villa María del Triunfo y Villa el Salvador con un valor alrededor de 25 t/km²/mes.

Del total de estaciones, el 81% sobrepasó el valor referencial de la OMS, mientras que las zonas adyacentes al litoral costero y algunos distritos residenciales se mantienen por debajo de dicho valor (esto se mantiene en el resto de estaciones).

Este comportamiento de alta contaminación por polvo atmosférico se debe a la débil configuración de la capa de inversión y por lo tanto a la mayor turbulencia cerca de la superficie originada por las diferencias bruscas en el calentamiento de las superficies contiguas que originan pequeños tornados o remolinos que son los agentes impulsores de la suspensión y re-suspensión.

El promedio de contaminantes sólidos sedimentables (polvo atmosférico) para el mes fue de 11,02 t/km²/mes. La **figura 2** muestra los totales de los sólidos sedimentables

b. Estación de otoño (abril):

Hacia el cono norte el núcleo se ubicó en el distrito de Independencia con un valor de 30,6 t/km²/mes. El segundo centro (cono centro-este) tuvo su núcleo en el distrito de El Agustino, con un valor de 17,5 t/km²/mes. Mientras que el tercer centro ubicado en el cono sur, se situó cerca al límite de los distritos de Villa María del Triunfo y Villa el Salvador con valores cercanos a 25 t/km²/mes.

El 65% de las estaciones de muestreo superaron el valor referencial de la OMS. El promedio de contaminantes sólidos sedimentables (polvo atmosférico) fue de 10,66 t/km²/mes. La **figura 3** muestra los

totales de los sólidos sedimentables. La relativa menor contaminación con respecto al verano se debe a que el fenómeno de turbulencia cerca de la superficie va disminuyendo y por lo tanto el fenómeno de la re-suspensión.

c. Estación de invierno (agosto):

Hacia el cono norte, el núcleo se presentó en el distrito de Independencia con 20,7 t/km²/mes, valor más alto del mes. El segundo que abarca el cono centro-este tuvo su núcleo en el Agustino con 18,3 t/km²/mes. Mientras que el tercer centro ubicado en el cono sur, se situó cerca al límite de los distritos de Villa María del Triunfo y Villa el Salvador con valores alrededor de 25 t/km²/mes. Del total de estaciones, el 62% sobrepasó el valor referencial de la OMS de 5 t/km²/mes. El promedio de sólidos sedimentables para este mes fue de 8,79 t/km²/mes. Ver **figura 4**.

Se puede observar que durante el invierno se registran los valores mínimos de contaminación debido a la mayor altitud de la base de la inversión que bien puede favorecer una mayor dispersión, también la menor presencia de los fenómenos de turbulencia cerca de la superficie (tornaditos) que son muy esporádicos dependiendo de las condiciones meteorológicas, implica que el fenómeno de suspensión y re-suspensión, se encuentran en su mínimo.

d. Estación de primavera (noviembre):

Hacia el cono norte la mayor concentración de polvo atmosférico se presentó en el distrito de Independencia con un valor de 23,0 t/km²/mes. El segundo centro (cono centro-este) tuvo su núcleo en el distrito de El Cercado (lado este) con 29,0 t/km²/mes, valor a su vez más alto del mes. Mientras que el tercer centro ubicado en el cono sur (en la zona de intercuenca Rímac-Lurín) tuvo su núcleo en el distrito de Villa María del Triunfo con un valor equivalente a 25,5 t/km²/mes.

El promedio de concentración de sólidos sedimentables (polvo atmosférico) fue de 10,53 t/km²/mes. El 78,3% del total de estaciones sobrepasa el límite referencial permisible establecido por la OMS de 5

t/km²/mes. Ver **figura 5**. La mayor contaminación que en el invierno y menor respecto al verano, se debe a que en esta estación, la inversión térmica entra en proceso de debilitamiento, el número de días de insolación va en aumento y por lo tanto el fenómeno de turbulencia cerca de la superficie también está en aumento, lo que propicia una mayor suspensión y re-suspensión que alcanza el máximo en verano donde los tornaditos son muy frecuentes.

e. Distribución espacial anual

Los elevados niveles de contaminación por polvo atmosférico en los centros identificados son explicados en la intensa actividad vehicular a lo largo de importantes avenidas, en la diversificada actividad comercial que acapara pistas y veredas, en la operación ininterrumpida de empresas no sujetas a un estricto

Todas estas características son sostenidas en débiles políticas municipales que dificultan la preservación y mantenimiento de las áreas verdes, cuya presencia resulta imprescindible en la medida en que no sólo matizan de color, proporcionan recreación y descanso visual a sus habitantes, sino que proporcionan el O₂ vital para los seres vivientes y captan el CO₂.

Las zonas adyacentes al litoral costero y algunos distritos residenciales se mantienen por debajo del valor referencial de la OMS ya que sus políticas municipales incentivan índices adecuados de vegetación que reducen el fenómeno de resuspensión de CSS y las brisas marinas que fluyen hacia el este favorecen la dispersión, por lo que no exceden el valor referencial establecido por la OMS.

En la **figura 6**, se observa la distribución anual de los CSS.

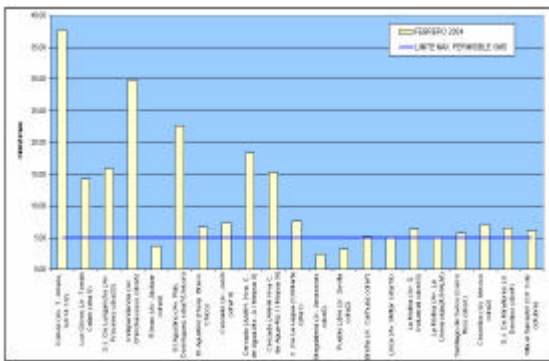


Fig. 2. Totales mensuales de CSS verano 2004 (febrero)

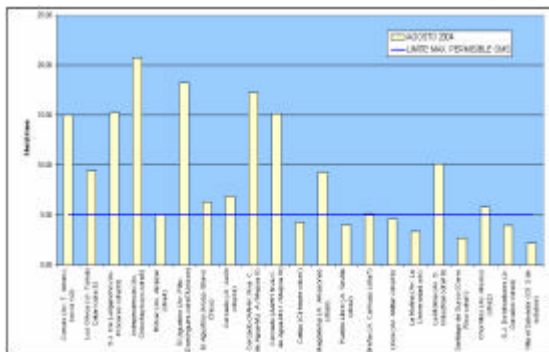


Fig. 4. Totales mensuales de CSS Invierno 2004 (agosto) ros de las condiciones meteorológicas y climáticas.

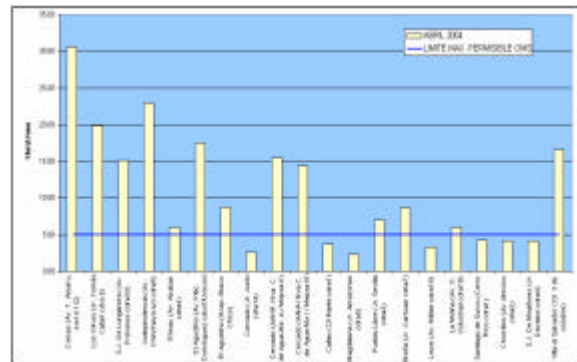


Fig. 3. Totales mensuales de CSS otoño 2004 (abril)

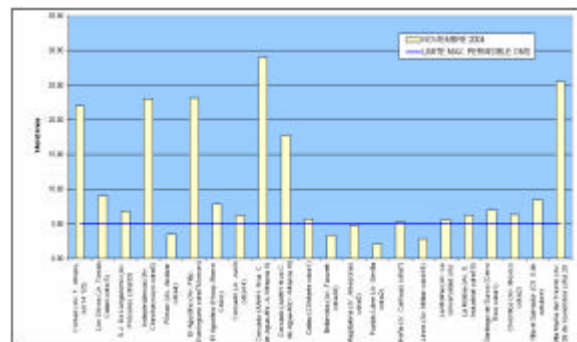
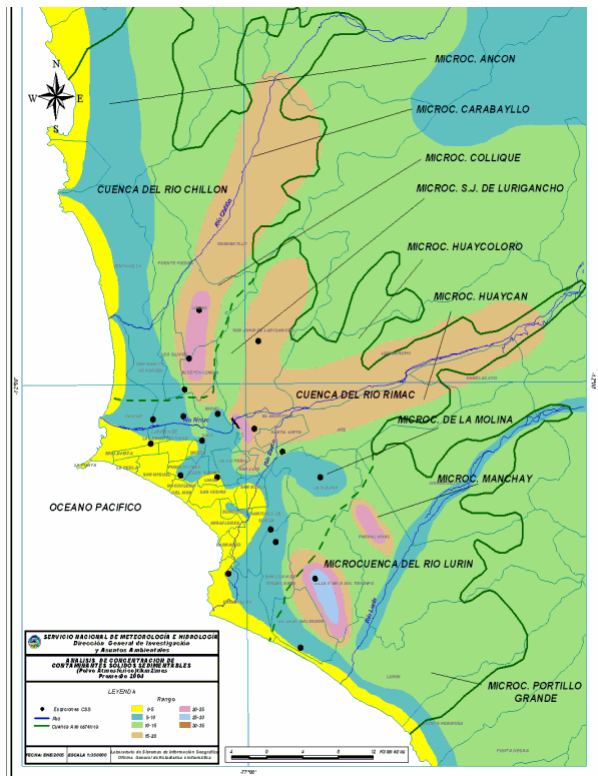


Fig. 5. Totales mensuales de CSS primavera 2004 (setiembre)

Fig.6. Distribución espacial de los CSS en Lima-Callao. Promedio 2004



4.2 Análisis de las condiciones meteorológicas

La evaluación de las condiciones meteorológicas para el año 2004 se ha basado en la información de la estación automática y de radiosondaje A.I. Jorge Chávez. A continuación se presenta el resumen de las mismas. Ver **cuadros 2 y 3 y 4**.

a. Estación de verano (febrero)

Propio de la estación de verano, las temperaturas presentaron un comportamiento ascendente y pese a ser el mes típico de verano, la humedad alcanzó la saturación.

La temperatura del aire tuvo una media de 23°C, mientras que la humedad relativa promedio fue de 82%.

b. Estación de otoño (abril)

Las condiciones descritas refieren el paulatino descenso de las temperaturas recién a mediados de la estación otoñal (mes de abril), con una temperatura media de 20,4°C, y una humedad relativa promedio de 85%.

c. Estación de invierno (agosto)

Durante el mes, los días se presentaron nublados parciales a despejados con brillo solar hacia el mediodía y con ligeras precipitaciones en horas de la noche principalmente durante la segunda quincena.

La temperatura promedio fue de 16,5°C, mientras que la humedad relativa de 84%.

d. Estación de primavera (noviembre)

Durante el mes de noviembre, las condiciones primaverales se fortalecieron en la última quincena, con presencia de brillo solar hacia el mediodía y extendiéndose hacia horas de la tarde.

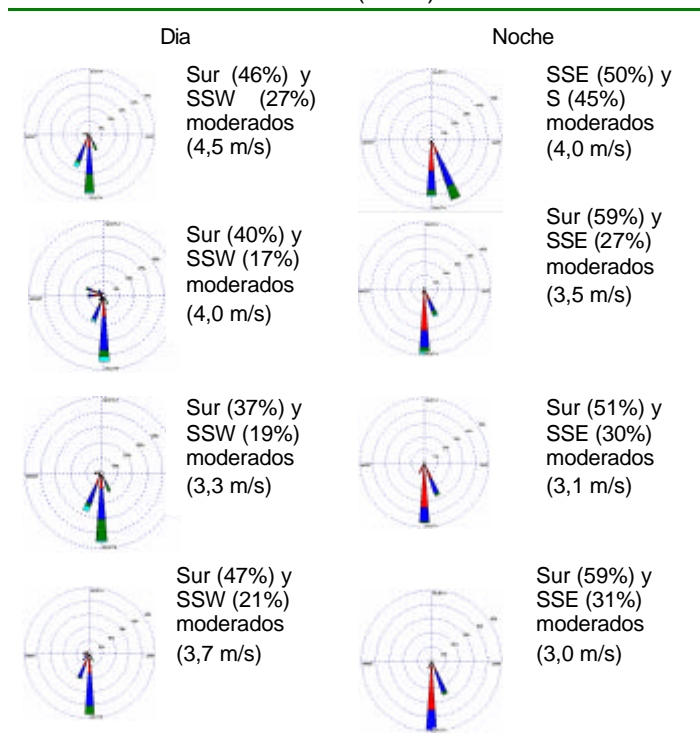
El promedio de la temperatura del aire fue de 19,4°C, mientras que la humedad relativa de 82%.

Cuadro 2. Condiciones meteorológicas de superficie registradas en Lima-Callao: TT y HR. 2004

E. del año	Temperatura (°C)		Humedad Relativa (%)	
	Min °C	Max °C	Min %	Max %
Verano	19 - 22	23 - 29	55 - 78	94 - 100
Otoño	15,7 - 20	21 - 26	65 - 83	94 - 100
Invierno	14 - 16	17 - 21	64 - 82	84 - 100
Primavera	17 - 19	21 - 24	65 - 73	88 - 94

Cuadro 3. Condiciones meteorológicas registradas en Lima-Callao: Velocidad y Dirección de viento 2004

Viento (vv/dd)



formales e informales, a las emisiones fugitivas de complejos industriales, a los botaderos de basura, a la quema de residuos sólidos, al importante déficit de áreas verdes y a la baja conciencia ambiental de la población.

-La mayor o menor concentración de contaminantes en un área determinada, depende no sólo de los aportes in situ sino también de los provenientes de otros lugares y que son transportados por el principal agente dispersor, el viento.

-El comportamiento de los contaminantes sólidos sedimentables (polvo atmosférico) monitoreado a través de una red de 24 estaciones, está sujeto a las variaciones estacionales. Así, en la estación de verano la concentración media es la máxima y en invierno la mínima; y durante las estaciones de transición se va delineando la tendencia respectiva, hacia los mínimos en abril y hacia los máximos en noviembre.

Cuadro 4. Condiciones meteorológicas de altura

PARAMETRO	UNIDAD	VERANO	OTOÑO	INVERNO	PRIMAVERA
Espesor	metros	162,3	536,7	584	516,7
Altura Base	metros	669,7	293,9	848	868,1
Altura Tope	metro	832,0	830,6	1432	1377,4
T Base	° C	18,8	17,4	9,7	12,9
T Tope	° C	20,1	20,8	20,2	17,9
Gradiente	°C /100metros	0,9	0,9	2,0	1,3
H.R. Base	%	93,4	95,5	94	89,5
H.R. Tope	%	75,7	60,0	17	47,8

V. Conclusiones

-Ciudades como Lima-Callao que experimentan un crecimiento urbano desordenado, informalidad en el uso de la tierra, frecuentes casos de falta de especificación de límites distritales por cuestiones de tributación, intensos aportes de contaminantes de las actividades socioeconómicas, entre otras, se caracterizan por presentar severos problemas de contaminación ambiental que deterioran seriamente la calidad de vida de la población.

-Las principales fuentes de contaminación in situ identificadas son atribuidas a la intensa actividad vehicular a lo largo de importantes avenidas de conexión interdistrital, a las actividades comerciales

-La concentración media de polvo atmosférico para el año 2004 fue de 10,3 t/km²/mes, en donde el 84% de las estaciones superaron el valor referencial permisible de la Organización Mundial de la Salud equivalente a 5t/km²/mes. En general, durante todos los meses se supera el valor referencial en más del 50% de las estaciones, con excepción de las áreas costeras y parte de algunos distritos residenciales.

VI. Referencias Bibliográficas

- (1) Comité de Gestión para la Iniciativa de Aire Limpio en Lima-Callao. 2004. Plan Integral de

- Saneamiento Atmosférico para Lima-Callao (PISA), 2005-2010. Lima, Perú.
- (2) Consejo Nacional del Ambiente. 2001. GEO PERU, 2000. Online.
 - (3) CONAM, 2004. Determinación del parque automotor del Perú. Estudio de consultoría PA Consulting Group. 117 pp. Lima, Perú.
 - (4) Vizcarra Andreu, M. 1992. Tecnósfera. La Atmósfera contaminada y sus relaciones con el público. 246pp. Lima, Perú.
 - (5) Sosa, A.; Muñoz ,C. 1992. Informe Final. Proyecto VICON. "Determinación y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica en Lima Metropolitana". Lima, Perú.
 - (6) Silva, J.; Concepción, E.; Montoya, Z. (2004): Evaluación de la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana de Lima-Callao. Boletín Meteorológico e Hidrológico de Perú. Parte IV. Año IV. SENAMHI. Lima, Perú.
 - (7) YACHAY. 1994. Ecología y Desarrollo Sostenible. Almanaque Mundial. Centro de Estudios y Asesoría-ONG. 238pp. Lima, Perú.
 - (8) Silva, J. 2000. Factores meteorológicos que influyen en la dispersión de la contaminación del aire en la ciudad de Lima. Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima. Vol.N°113:2000. Lima, Perú.
 - (9) MINSA. 2003. Análisis de Situación de Salud. Dirección de Salud V Lima Ciudad. Lima, Perú.
 - (10) González, A. ; Vega, F.; Abarca, S. 2000. Programa para mejorar la Calidad del Aire. Tijuana Rosarito. 2000-2005. México D.F.
 - (11) Consultora SwissContact. 2001. Manual de Laboratorio -Proyecto Monitoreo del aire. Programa de Aire Puro para Centro América. Lima, Perú.
 - (12) Silva, J.; Vilca, J.; Montoya, Z. (2002). Manual para el Diagnóstico de Línea Base de Calidad del Aire. SENAMHI. Lima, Perú.