

EVALUACION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA EN LA ZONA METROPOLITANA DE LIMA-CALLAO ENERO - 2009

Por: Ing. José Silva Cotrina
Ing. Zarela Montoya Cabrera
Sra Rosalinda Aguirre Almeyda
SO1 FAP Rigoberto Duránd Montes

1. Resumen

El boletín del mes de enero 2009 muestra los resultados de la evaluación del material particulado y contaminantes gaseosos en relación a las condiciones meteorológicas registradas en la red automática de la Zona Metropolitana de Lima-Callao compuesta por las estaciones de El Callao, Jesús María y La Molina. En cuanto a los contaminantes particulado, el polvo atmosférico sedimentable (PAS) registró una media de 12,1 t/km²/mes, máxima de 34,5 t/km²/mes en el distrito de Pachacamac y mínima de 1,4 t/km²/mes en La Molina; mientras que las concentraciones de material particulado menor a 10 micras (PM10) no excedieron el ECA Nacional de 150 ug/m³ en ninguno de los días evaluados, alcanzando su máximo medio diario el valor de 49,7 ug/m³. En cuanto a los contaminantes gaseosos, el dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre, ambos normados en el Reglamento Nacional de Estándares de Calidad del Aire D.S. N° 074-PCM-2001, presentaron sus máximas concentraciones horarias el día jueves 08 de enero equivalente a 38,0 ppb (11:00 horas), y diaria (para el SO₂) de 5,4 ppb, no excediendo en ningún caso los ECAs establecidos, lo que sin embargo, no exime estrictamente a la población de estar expuesta a compuestos que pueden generar alteraciones a su salud. De acuerdo a la vigilancia sinóptica, utilizando salidas de modelos de NCAR/NCEP y del CPTEC, la evolución de los sistemas atmosférico-océánicos y terrestres y sus interacciones que influyen en el clima de la costa central de Perú, muestran que el Anticiclón del Pacífico sur-oriental –APS- presentó un comportamiento variable, con núcleo oscilando entre 1016 a 1032 hPa y promedio de 1024 hPa. Así, en la primera década presentó núcleo con mínimo de 1024 hPa en los 35°S y máximo de 1028; en la segunda década un núcleo mínimo de 1022 hPa y máximo de 1032, y una baja en el norte de Chile que indujo la presencia de vientos del nortote, un relajamiento en el afloramiento marino, presencia de brillo solar e incremento de la temperatura del aire; en la tercera década presentó un núcleo mínimo de 16 hPa y máximos de 1026 hPa en 40°S y 102°Oeste, es decir alejado de la costa, lo que favoreció la presencia de brillo solar a lo largo de la costa Sudamericana al bloquear la incursión de sistemas frontales hacia latitudes medias. Relacionado a lo anterior, los vientos a lo largo de la costa peruana variaron entre débiles 1 y 3 m/s los días en que el APS presentó debilitamiento o se ubicó sobre los 40 y 45°S a moderados y fuertes 4 y 6 m/s cuando éste se intensificó o se ubicó al norte de los 40°S como en la segunda década entre los días 15 y 17; en consecuencia, el afloramiento marino de la corriente fría de Humboldt a lo largo de la costa peruana y el fenómeno de la inversión térmica por subsidencia, se mostraron mayormente debilitados; por lo tanto, la temperatura superficial del mar -TSM y la temperatura del aire mostraron un sostenido incremento respecto al mes anterior, debido a que nos acercamos al mes más cálido de la costa peruana durante la estación de verano del Hemisferio Sur. La nubosidad estratiforme que se configura por debajo de la base de la inversión térmica, se mostró también debilitada; los días que estuvo presente originó condiciones de cielo cubierto en las mañanas con presencia de fina garúa en los distritos del litoral, variando alrededor del medio día y hacia los distritos del este a condiciones de nublado parcial, nubes dispersas o despejado con presencia de intensa insolación. Asimismo, se observó el predominio de la nubosidad media y alta como consecuencia de la mayor frecuencia e intensidad de los trasvases de masas de aire húmedas desde la Amazonía hacia las vertientes occidentales de los Andes, donde en las partes altas de las cuencas hidrográficas están ocasionando mayor pluviosidad. De este modo, las condiciones descritas y sus interacciones con la rugosidad del terreno debida a las edificaciones, propiciaron en promedio, un incremento de los fenómenos de turbulencia térmica y mecánica del aire que mantienen al polvo atmosférico sedimentable, con tendencia a incrementar sus concentraciones.

2. Metodología

2.1 Del monitoreo de los contaminantes sólidos sedimentables

La información empleada para el análisis corresponde a la obtenida de la red de muestreo de polvo atmosférico compuesta por 43 estaciones ubicadas en el ámbito de la cuenca atmosférica de la zona metropolitana de Lima-Callao (figura 1). El método de muestreo pasivo desarrollado es el que se describe a continuación:

- **Fase preliminar de gabinete:** consiste en la preparación en laboratorio de las placas receptoras que serán empleadas en campo.
- **Fase de campo:** consiste en el reemplazo de las placas receptoras impregnadas de contaminantes por las que recién han sido pesadas, y su posterior evaluación en laboratorio. Observaciones tales como actividades de construcción cercana a la estación, manipulación por terceros, mantenimiento, paralización, entre otras, son anotadas en una bitácora para la validación posterior de la calidad de la información.
- **Fase de laboratorio:** por el método gravimétrico se determinan las concentraciones correspondientes a cada una de las estaciones de observación.
- **Fase de gabinete:** involucra el procesamiento, análisis e interpretación de la información, salida de reportes preliminares, cuadros, mapas, gráficos y la elaboración del boletín mensual.

2.2 Del monitoreo de partículas en suspensión menores a 10 micras (PM10)

La información horaria de las concentraciones de partículas PM10 son recopiladas del monitor TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) Serie 1405 instalado en la estación meteorológica ambiental Campo de Marte (**figura 1**), el cual tiene un mecanismo de tiempo real para la medición de la concentración de las partículas en el aire tanto en interior como exterior y que opera con un flujo total de entrada mínimo de la toma de la muestra: 16.7l/min (1m³/h), flujo de la toma principal: 3l/min y temperatura de la corriente de la muestra: 50° C. Los equipos TEOM son monitores basados en filtros de masa que miden la masa de las partículas suspendidas de la corriente del gas en ese momento. A continuación se describe el procedimiento para la recopilación de la información:

- **Fase de campo:** consiste en la exposición de los filtros TEOM de 15 mm de diámetro durante aproximadamente 23 días, en los cuales el filtro alcanza su saturación y debe ser cambiado; ésta consideración varía en función a la zona en donde se realiza la medición. Se controla el flujo y temperaturas de operación. Descarga de la información mediante cable RS-232, USB y en forma remota.
- **Fase de gabinete:** involucra el procesamiento, análisis e interpretación de la información tomando como referencia el D.S. N°074 –PCM-2001 “Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire” y la R.D. N° 1404/2005/DIGESA/SA “Protocolo de Monitoreo de la Calidad del Aire y Gestión de los Datos”.

2.3 Monitoreo de contaminantes gaseosos

La evaluación horaria, diaria y mensual de los gases contaminantes del aire (óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre) en la Estación de Calidad de Aire ubicada en la Sede Central (figura 1) se realiza de acuerdo a la siguiente metodología:

- Fase de campo: operación continua de analizador automático de óxidos de nitrógeno API200E y dióxido de azufre 43i en la estación de calidad del aire SENAMHI. Descarga de la información mediante cable RS-232, Ethernet y vía remota. Se realiza el cambio de filtros cada 15 días en promedio y la inspección de fugas y limpieza en la línea de ingreso de muestra. Calibración según método aprobado por EPA.
- Fase de gabinete: involucra el procesamiento, análisis e interpretación de la información tomando como referencia el D.S. N°074 –PCM-2001 “Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire” y la R.D. N° 1404/2005/DIGESA/SA “Protocolo de Monitoreo de la Calidad del Aire y Gestión de los Datos”.

2.4 De la Información Meteorológica

Para la evaluación de las condiciones meteorológicas de la Zona Metropolitana de Lima-Callao en el presente informe se ha utilizado la información proveniente de los siguientes lugares de observación:

Dirección General de Investigación y Asuntos Ambientales

automática y radiosondaje del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (Callao), automática Campo de Marte (Jesús María) y automática Lima Este (La Molina), las mismas que son presentadas en la **figura 1**. La metodología de trabajo es la siguiente:

- **Fase de recopilación:** involucra el proceso de obtención y concentración de la información meteorológica de las estaciones señaladas.
- **Fase de control de calidad y consistencia:** involucra la revisión de los datos, eliminación de inconsistencias y completación de la data a través de herramientas estadísticas.
- **Fase de procesamiento, análisis e interpretación:** involucra el procesamiento numérico, gráfico, análisis e interpretación de los resultados.

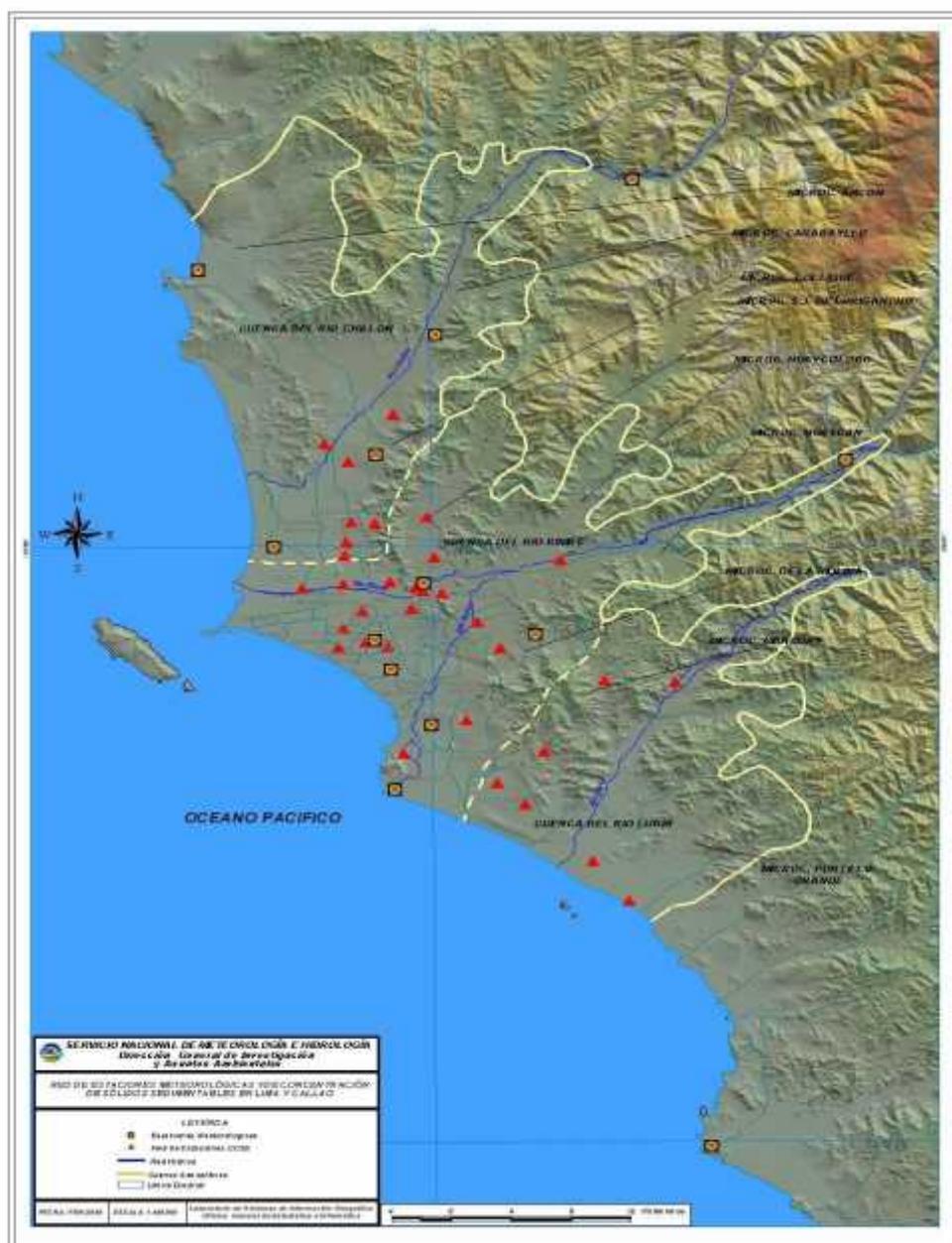


Fig. 1 - Red de estaciones meteorológicas y de muestreo del polvo atmosférico sedimentable (PAS) en la Zona Metropolitana de Lima-Callao

3. Resultados del monitoreo ambiental

3.1.1 Del Polvo Atmosférico Sedimentable (PAS)

La evaluación del polvo atmosférico sedimentable se realiza en el ámbito de la cuenca atmosférica de Lima-Callao. La red compuesta de 43 estaciones de muestreo es presentada en la **figura 1**.

Durante el mes de enero se recopiló información de 39 estaciones, de las cuales el 74 % superaron el nivel referencial permisible de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 5 t/km²/mes, con una media de 12,1 t/km²/mes.

En el **cuadro N° 1** se observan los principales núcleos de la zona de Lima y Callao. En cuanto a los valores extremos, el máximo se registró en el distrito de Pachacamac (34,5 t/km²/mes), y el mínimo de 1,4 t/km²/mes en La Molina. La dirección predominante de los vientos para las estaciones de la red meteorológica automática de SENAMHI varió durante las horas del día, siendo en promedio de componente sur en las estaciones principalmente colindantes al litoral y de componente oeste hacia el este de la ciudad, con intensidades predominantemente débiles a moderadas y fuertes hacia el este de la ciudad; éstos, en interacción con la rugosidad natural y artificial impuesta por las edificaciones, determinaron niveles medios ligeramente superiores a los registrados en diciembre y siempre superiores al nivel permisible (2,4 veces).

Cuadro N° 1: Concentraciones de polvo atmosférico sedimentable o contaminantes sólidos sedimentables diciembre 2008 y enero 2009 (t/km².mes)

Conc t/km ² . mes	N° est	% de estaciones Sobrepasa nivel ref.	Núcleos principales (puntuales y promedios)				X t/km ² /mes	Máx t/km ² /mes	Mín t/km ² /mes
			Lima Norte	Lima Centro-este	Lima Sur-este	Lima Sur			
Diciem bre 2008	39	75	37,0 (Independencia)	22,8 (El Agustino, El Cercado, Lurigancho)	24,5 (Pachacamac)	34,6 (V.M.T.; Lurín)	12,5	37,0 (Independencia)	2,6 (J. María)
Enero 2009	39	74	32,3 (Independencia)	24,3 (El Agustino, El Cercado, Lurigancho)	34,5 (Pachacamac)	32,1 (V.M.T.; Lurín)	12,2	34,5 (Pachacamac)	1,4 (La Molina)

En la **figura 2** se muestran las concentraciones registradas en los meses de diciembre 2008 y enero 2009.

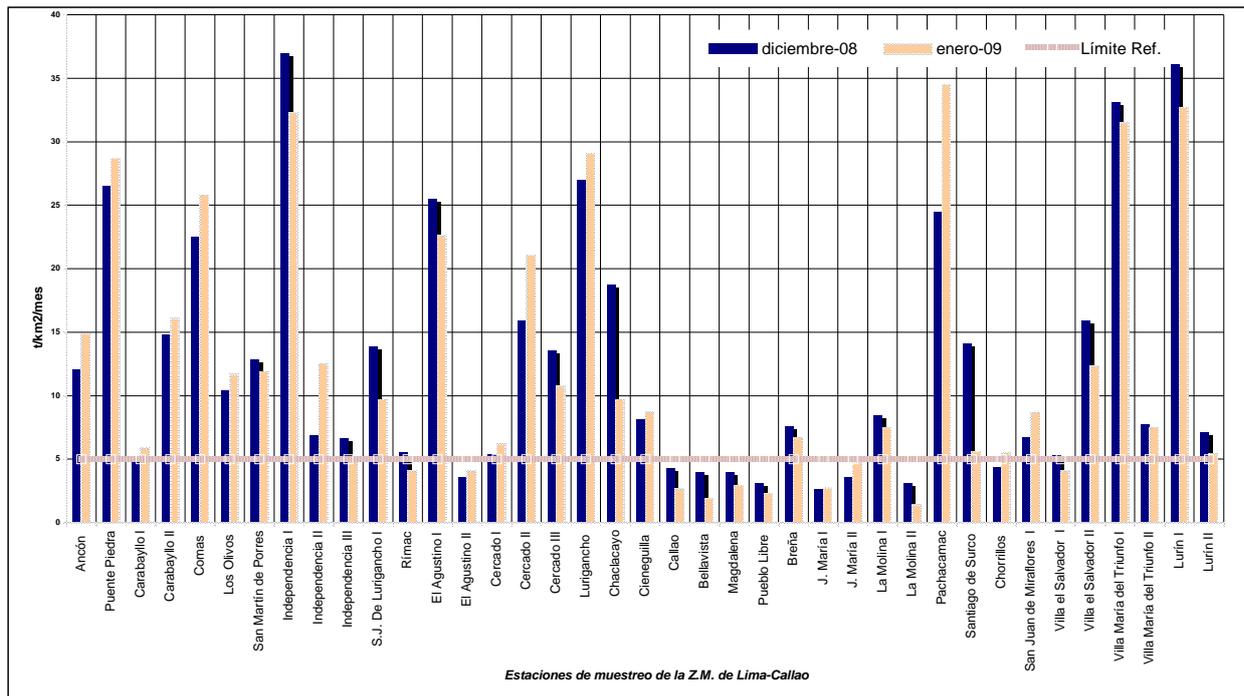


Fig.2-Totales mensuales de polvo atmosférico sedimentable (contaminantes sólidos sedimentables) registrados en diciembre 2008 y enero 2009 en Lima-Callao

La configuración urbana local, el incremento tanto del tráfico vehicular y de una red vial con deficiente mantenimiento, así como de las actividades industriales, comerciales y de servicios con una postergada política nacional de ordenamiento territorial, ello en interacción con las condiciones meteorológicas que se presentaron durante enero, facilitaron la configuración de persistentes zonas críticas de alta contaminación en Lima-Callao, con una media inferior y valores también inferiores en las zonas críticas respecto al mes anterior. De acuerdo a lo descrito, en la **figura 3**, las 4 principales zonas críticas son: hacia Lima norte (cuenca del río Chillón) se observa el primer centro, extendiéndose hacia la jurisdicción de los distritos de Independencia, Comas, Carabaylo, Pte. Piedra, Ancón, Sta. Rosa, Ventanilla, Los Olivos y San Martín de Porres, cuyo núcleo en el distrito de Independencia tiene un valor de 32,3 t/km²/mes. El segundo centro abarca Lima centro-este (cuenca del río Rímac y microcuencas de San Juan de Lurigancho y Huaycán, y comprende los distritos de San Juan de Lurigancho, Lurigancho, Chadacayo, Ate-Vitarte, Sta. Anita, el Agustino, y el Cercado (lado este), con núcleo en el distrito de Lurigancho de 24,3 t/km²/mes. El tercer centro ubicado en Lima sur-este tiene su núcleo en el oeste del distrito de Pachacamac (microcuenca de Manchay), comprende los distritos de Pachacamac, sureste de La Molina y suroeste de Cieneguilla, con valor de 34,5 t/km²/mes en Pachacamac; mientras que el cuarto centro en Lima sur que comprende los distritos de Villa El Salvador, Villa María del Triunfo y Lurín, se presenta fraccionado en Villa María del Triunfo y Lurín con valores de 31,5 y 32,7 t/km²/mes, respectivamente. Los distritos cercanos al litoral costero y parte de algunos residenciales, comprendidos dentro de la estrecha franja amarilla, se mantuvieron por debajo del límite (5 t/km².mes), favorecidos por la influencia de las brisas marinas y políticas de gestión municipal saludables.

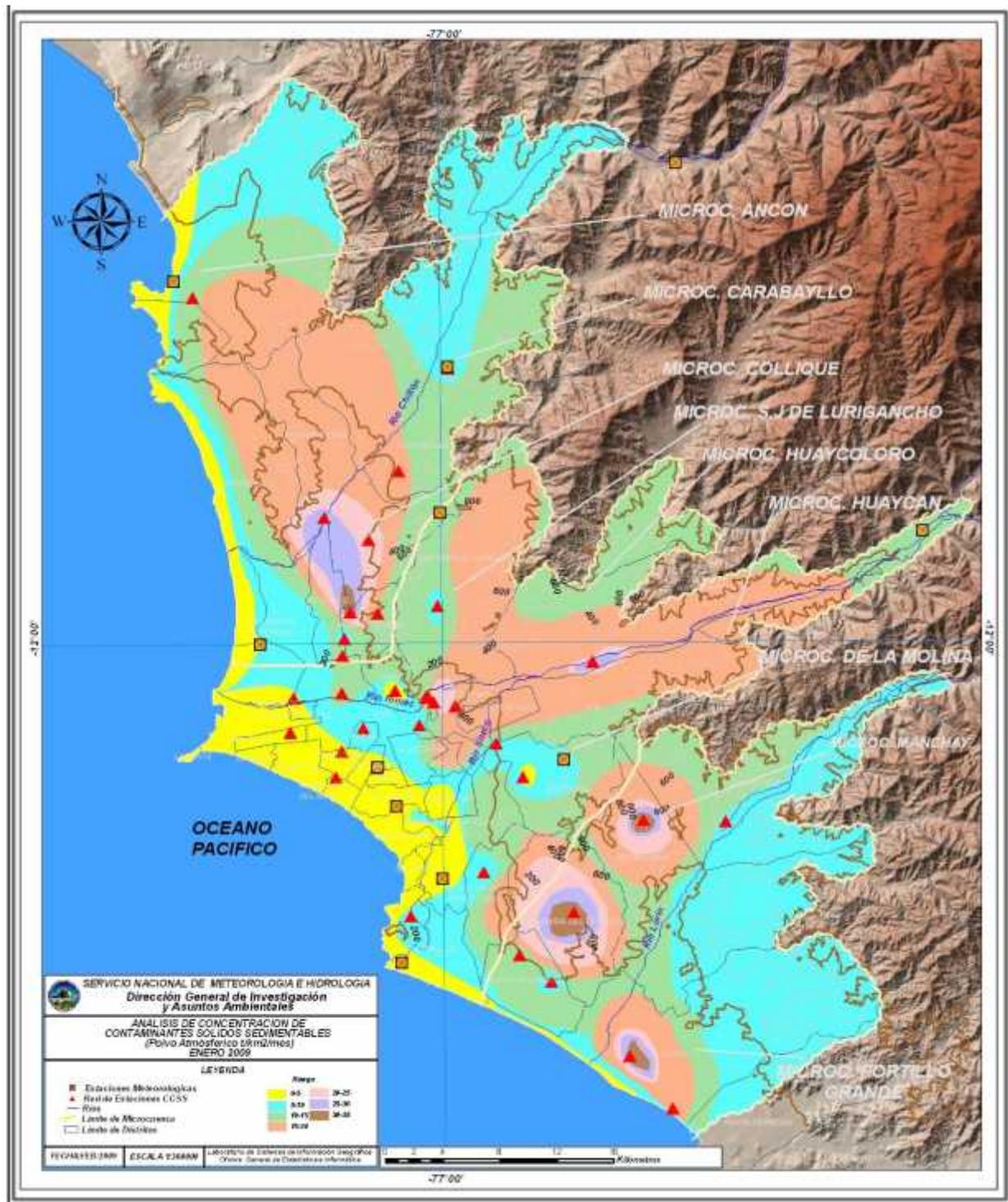


Fig. 3- Análisis espacial de la concentración del polvo atmosférico sedimentable en la cuenca atmosférica de Lima-Callao durante el mes de enero 2009

3.1.2 De las partículas menores a 10 micras (PM10)

Las PM10 se definen como partículas con diámetro de masa aerodinámica media menor a 10 micrómetros (μm), las cuales también conocidas como partículas gruesas. El comportamiento de éstas, y en general el de las diferentes fracciones de partículas obedecen a los niveles de actividad humana en las áreas de influencia del monitoreo y las condiciones meteorológicas de corto plazo.

La información registrada por el monitor continuo de partículas en la estación Campo de Marte según la **figura 4**, muestra un registro máximo horario de 101 ug/m^3 ocurrido el viernes 23 de enero a las 09:00 horas; y mínimo horario de $1,5 \text{ ug/m}^3$ el día domingo 18 de enero a las 15:00 horas.



Fig. 4

El valor medio diario mensual correspondió a 31,9 ppb. De acuerdo a lo observado en la **figura 5**, el Estándar de Calidad del Aire Nacional (ECA) para 24 horas de 150 ug/m^3 , no fue superado durante el período de evaluación, así el máximo valor promedio diario de $49,7 \text{ ug/m}^3$ correspondió al 33 % del estándar nacional de calidad del aire. Sin embargo, con fines de análisis para evaluar el ECA, es posible compararlo con las máximas concentraciones diarias obtenidas durante el período de medición, considerando que éstas constituyen el principal problema de contaminación en la ciudad. Así, de la evaluación de las máximas concentraciones diarias, el máximo valor diario correspondió al 67,3 % del ECA (101 ug/m^3). Ver **figura 6**.



Fig. 5

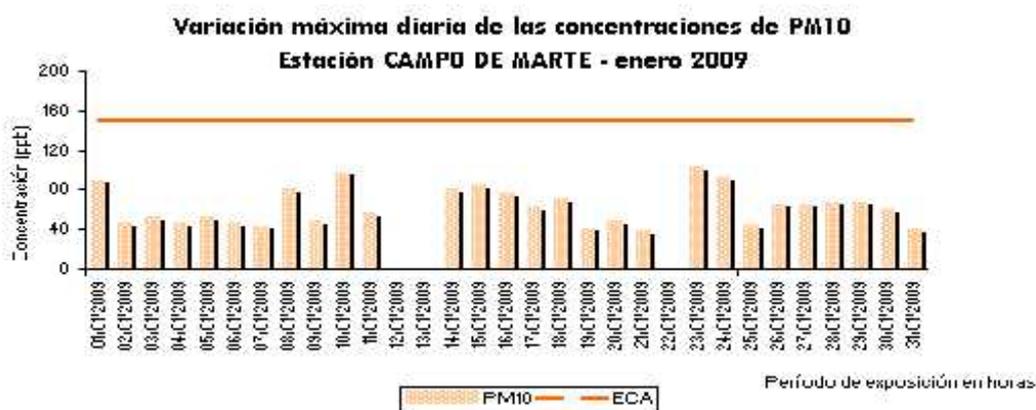


Fig. 6

En cuanto a la variación de las concentraciones medias horarias de PM10 presentada en la **figura 7**, se observa un comportamiento bimodal definido por dos picos horarios máximos de 48,6 ppb a las 06:00 y de 35,5 a las 20:00 horas, coincidiendo de esta manera con las horas de mayor desplazamiento humano e influenciado siempre por las intensidades del viento que empieza a intensificarse desde horas del mediodía alcanzando 0,8 m/s que favorecen la dispersión del contaminante. Cabe mencionar que las PM10 se forman en su mayoría por procesos mecánicos, proviniendo principalmente del polvo natural de la atmósfera en permanente proceso de suspensión y re-suspensión, y también de las emisiones industriales y parque automotor.

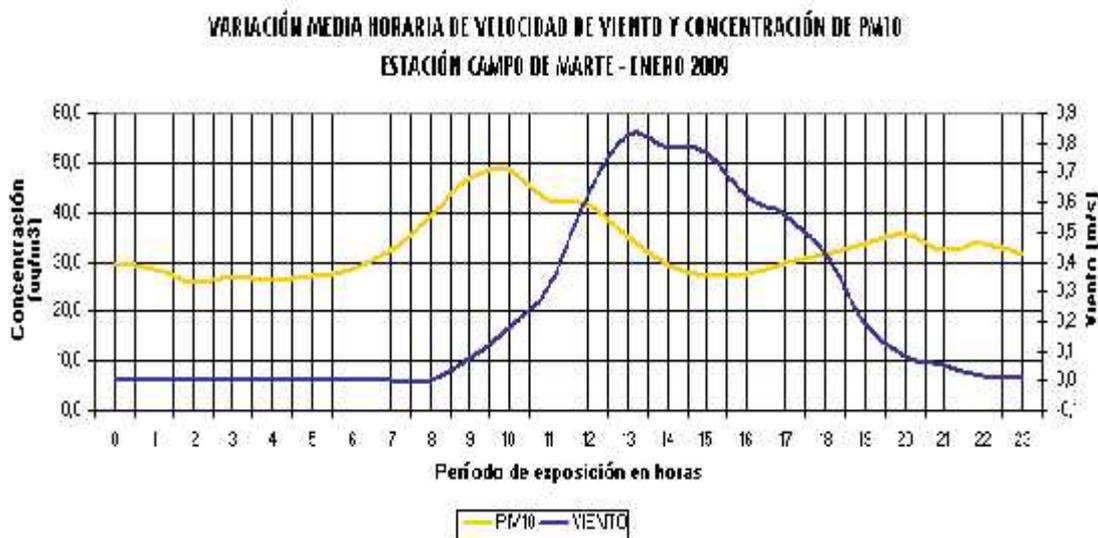


Fig. 7

Las Rosas de Concentración presentadas en la **figura 8** muestran principalmente la dirección predominante de las PM10 proveniente del SW en relación a la distribución de sus concentraciones para el mes de enero y por períodos horarios que corresponden a los momentos del día en donde se reportan las máximas (09 horas y 20 horas) de 44,9 ug/m³ y 33,9 ug/m³ , respectivamente y mínimas concentraciones (entre 12 y 16 horas) de 29,6 ug/m³ .

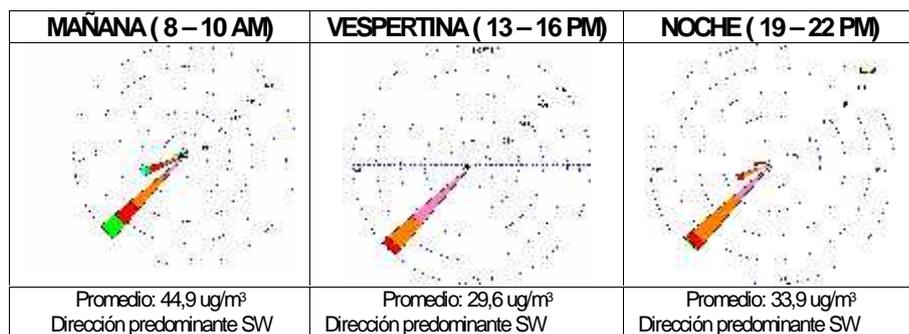


Figura 8. Rosas de Concentración de PM10 – enero 2009

En el **Cuadro N ° 2** se muestra el comportamiento semanal de las concentraciones de PM10. La mayor concentración se presentó el día jueves (37,7 ug/m³). Mientras que el día domingo se registró en promedio la menor concentración (26,8 ug/m³), asociándose ello al desplazamiento humano, con menores concentraciones los días no laborables. Como también se puede observar en la **figura 9**, las concentraciones de PM10 tienden a decrecer hacia los fines de semana, principalmente el día domingo; la mediana de las concentraciones, que corresponden al percentil 50 fue de 30 ug/m³.

Cuadro N° 2. Estadística semanal de las concentraciones de material particulado menor a 10 micras (PM10) - enero 2009

Día	máximo	día	hora	mínimo	día	hora	promedio
Lunes	64,6	26-ene	12:00	10,9	05-ene	3:00	29,2
Martes	77,1	13-ene	12:00	6,0	13-ene	0:00	32,2
Miércoles	79,4	14-ene	2:00	14,8	21-ene	3:00	33,3
Jueves	88,3	01-ene	3:00	12,3	01-ene	17:00	37,7
Viernes	101	23-ene	09:00	8,4	23-ene	2:00	34
Sábado	97,2	10-ene	12:00	13,6	31-ene	11:00	34,6
Domingo	68,7	18-ene	02:00	1,5	18-ene	15:00	26,8

Box Plot de las concentraciones semanales de PM10

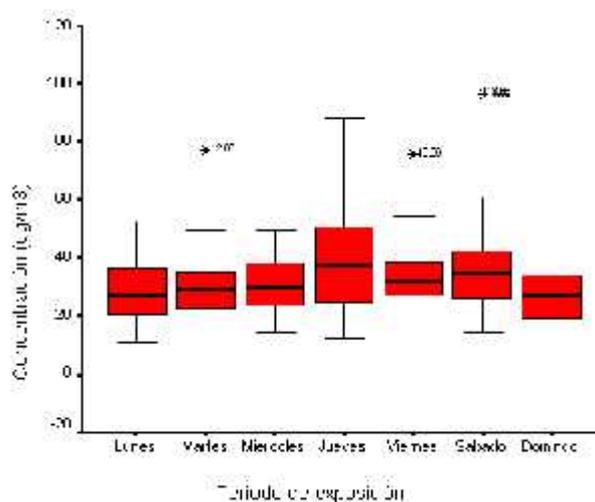


Fig. 9

3.1.3 De los contaminantes gaseosos:

3.1.3.1 Óxidos de Nitrógeno

El término genérico para denominar al óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂) es el de óxidos de nitrógeno (NO_x).

La información registrada por el analizador en la estación de calidad de aire de la sede central del SENAMHI según la **figura 10**, muestra registros máximos horarios de NO de 99,7 ppb y de NO₂ de 38,0 ocurridos el jueves 08 de enero a las 20:00 horas y a las 11:00 horas, respectivamente; y mínimos horarios entre 0 y 0,4 ppb en horas comprendidas entre las 3, 4 y 5:00 horas de la madrugada. El valor medio del mes del gas dióxido de nitrógeno (NO₂), contemplado en el D.S. N° 074 PCM -2001 por asociarse su exposición a efectos observables sobre la salud humana, fue de 13,0 ppb, inferior respecto al mes anterior por las ya establecidas estación de verano. Bajo las condiciones meteorológicas reportadas en el mes de enero caracterizado por temperaturas medias de 22,6 ° C y la presencia de días con brillo solar desde las primeras horas de la mañana y hacia el atardecer, se favorecieron los rápidos procesos de reconversión de NO₂ a NO como resultado de la fotólisis. Así, el 74 % de las veces la concentración de NO fue superior a las concentraciones de NO₂ (27 %), salvo en horas de la noche, en donde éste último no es capaz de fotodisociarse, por ausencia de luz solar, y tiende a acumularse y lentamente reaccionar con otros óxidos de nitrógeno tales como el NO₃. Propio del asentamiento de la estación de verano, se espera el incremento de las concentraciones de NO y la consiguiente disminución de las concentraciones de NO₂.

El máximo valor horario registrado en el período de estudio para el NO₂ (38 ppb) correspondió al 36 % del estándar nacional de calidad del aire para una hora que es de 104,6 ppb (200 ug/ m³). Sin embargo, no sobrepasar un valor estándar, no garantiza que la calidad del aire de los alrededores sea buena si se analiza el ámbito de estudio; es necesario realizar muchas observaciones y buscar siempre representar lo mejor posible la influencia de las fuentes de los contaminantes sobre la calidad del aire y el impacto sobre la salud de los receptores. Además de la interacción entre los contaminantes y las condiciones meteorológicas presentes que pueden favorecer o no altas concentraciones, normalmente en microambientes si estos gases pueden superar los estándares.

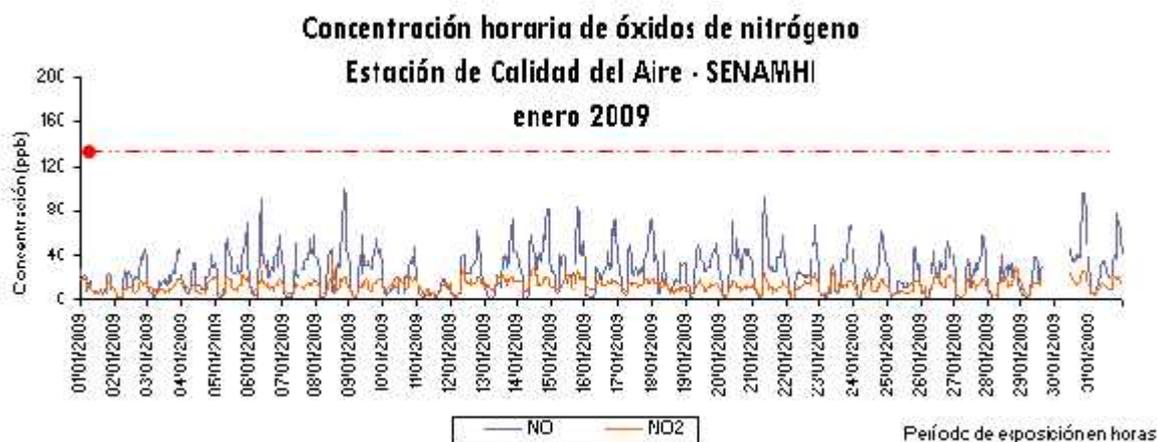


Figura 10.

El valor recomendado en las actuales directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para proteger a la población de los efectos nocivos del NO₂ gaseoso no ha cambiado con respecto a las Directrices anteriores.

En cuanto a la variación de las concentraciones máximas medias horarias de los NO_x presentadas en la **figura 11**, se observa un comportamiento bimodal caracterizado por dos picos horarios máximos de 36,1 ppb de NO y 16,3

ppb de NO₂ hacia las 9 y 20: 00 horas respectivamente; y de 49,8 ppb de NO y 17,7 ppb de NO a las 20h y a las 19,20 y 21 horas, respectivamente, coincidiendo de esta manera con las horas de mayor actividad vehicular, caracterizándose siempre por presentar los mayores valores en horas de noche; ello, en relación también con las variaciones de la intensidad del viento durante el día, con un máximo de 0,8 m/s entre las 13 – 15 horas . De otro lado, según se explicó, el NO₂ se forma a partir de las concentraciones de NO, que está estrechamente ligado al parque automotor, a través de un proceso de interconversión química; por ello, es que existe un desfase horario entre las concentraciones del NO y del NO₂.

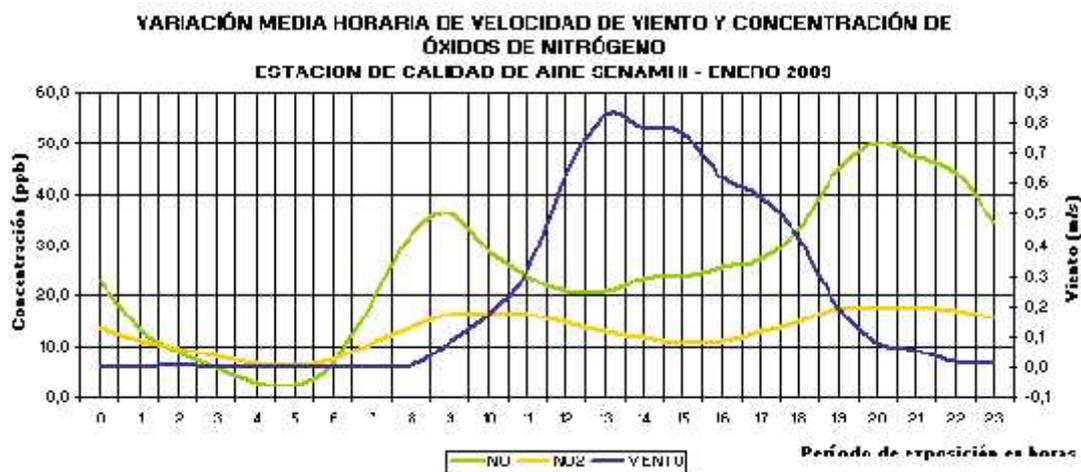


Figura 11.

Las Rosas de Concentración presentadas en la **figura 12** muestran principalmente la dirección predominante del gas dióxido de nitrógeno proveniente del SW en relación a la distribución de sus concentraciones para el mes de enero y por períodos horarios que corresponden a los momentos del día en donde se reportan las máximas (09 horas y 20 horas) de 15,5 ppb y 17,4 ppb, respectivamente y mínimas concentraciones (entre 12 y 16 horas horas) de 11,5 ppb.

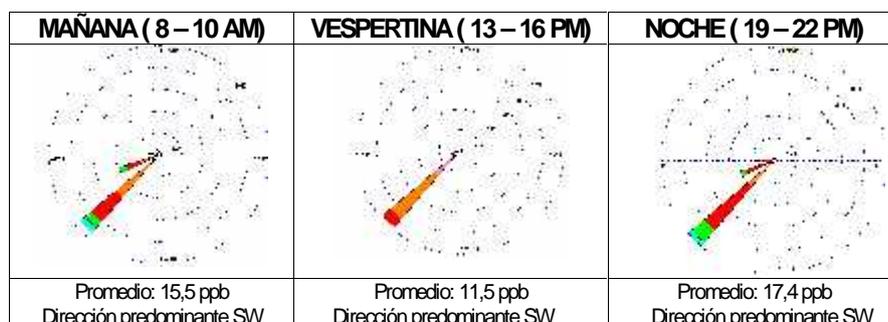


Figura 12. Rosas de Concentración de Dióxido de Nitrógeno – enero 2009



En el **Cuadro N° 3** se muestra el comportamiento semanal de las concentraciones de NO₂. Las mayores concentraciones se presentaron los días miércoles y jueves (27,9 y 28,0 ppb), respectivamente. Mientras que el día domingo se registró en promedio la menor concentración (10,7 ppb), mostrándose, de forma similar al comportamiento de otros contaminantes, su asociación al desplazamiento humano, con menores concentraciones los días no laborables.

Cuadro N° 3. Estadística semanal de las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO₂) enero 2009

Día	máximo	día	hora	mínimo	día	hora	promedio
Lunes	25,0	12-ene	9:00	1,1	26-ene	4:00	13,5
Martes	25,6	06-ene	9:00	1,9	27-ene	5:00	13
Miércoles	27,9	28-ene	9:00	2,7	21-ene	5:00	13,8
Jueves	28	01-ene	11:00	2,9	22-ene	5:00	13,4
Viernes	26,1	30-ene	20:00	0,4	02-ene	5:00	13,1
Sábado	21,8	10-ene	18:00	4,9	24-ene	4:00	13,2
Domingo	20,3	04-ene	23:00	3,6	25-ene	4:00	10,7

Asimismo, en la **figura 13** se presenta el comportamiento medio de cada uno de los días de la semana del mes de enero del dióxido de nitrógeno.

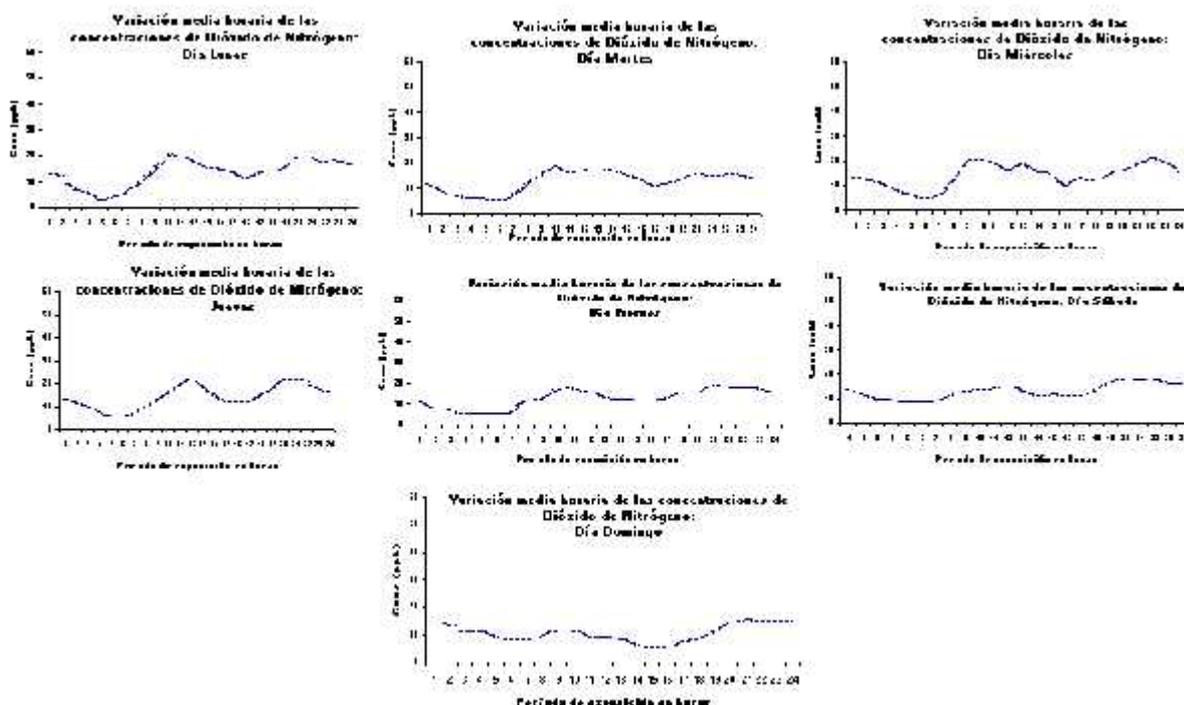


Figura 13 Variación semanal de las concentraciones de dióxido de nitrógeno – enero 2009

3.1.3.2 Dióxido de Azufre

El dióxido de azufre es un contaminante del aire que provoca efectos negativos sobre la salud humana, principalmente sobre el sistema cardiovascular, sobre los ecosistemas, como la acidificación del agua y los suelos, y sobre los materiales.

La información registrada por el analizador en la estación de calidad de aire de la sede central del SENAMHI según la **figura 14**, muestra un registro máximo horario de 14,3 ppb, ocurrido el jueves 08 de enero a las 12:00 horas; y mínimos horarios de 0 ppb en horas comprendidas entre las 3 y 5:00 horas. El valor medio del mes del gas dióxido de azufre (SO₂) fue de 2,6 ppb, inferior al del mes anterior.



Figura 14.

El valor medio diario mensual correspondió a 2,6 ppb. De acuerdo a lo observado en la **figura 15**, el ECA nacional para 24 horas de SO₂ equivalente a 144,9 ppb no fue superado durante el período de evaluación. El máximo valor promedio diario registrado en el período de estudio de 5,6 ppb correspondió al 4 % del estándar nacional de calidad del aire. La Organización Mundial recomendó el cambio de los valores guía de SO₂ de 125 a 20 µg/ m³ tomando en cuenta consideraciones tales como la comprobación de que el SO₂ tiene efectos en la salud a concentraciones muy inferiores a los aceptados hasta ahora por lo que se necesita un mayor grado de protección.

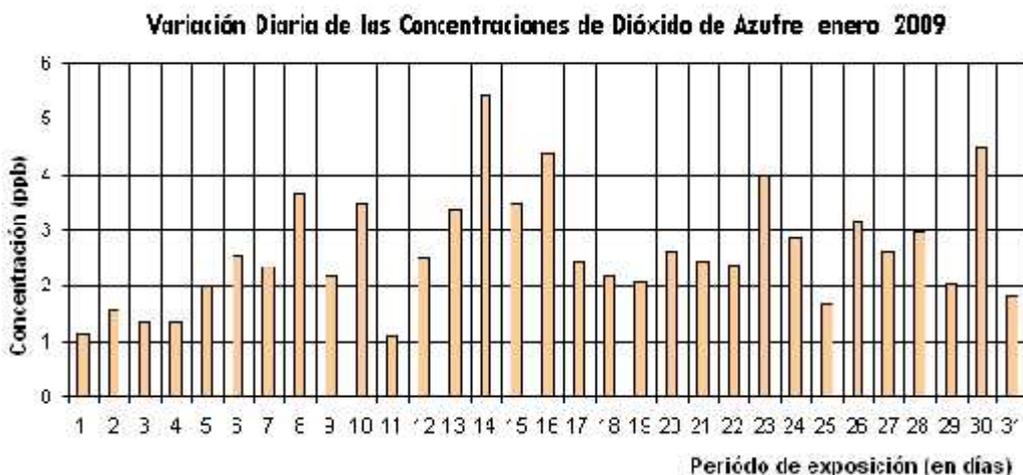


Figura 15.

En cuanto a la variación de las concentraciones medias horarias de SO₂ presentada en la **figura 16**, se observa un patrón bimodal definido por dos picos horarios máximos de 4,7 ppb a las 11:00 y de 3,4 a las 20:00 horas, coincidiendo de esta manera con las horas de mayor actividad vehicular e influenciado siempre por las intensidades del viento que empieza a intensificarse desde horas del mediodía favoreciendo la dispersión del SO₂

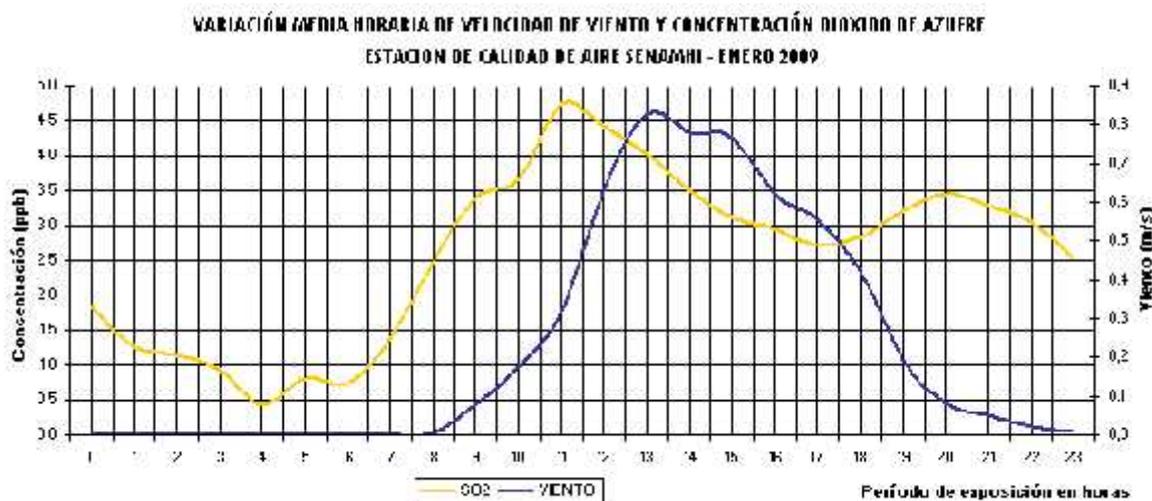


Figura 16.

De forma similar a la asociación entre la velocidad del viento y el comportamiento del contaminante, las rosas de Concentración presentadas en la **figura 17** muestran principalmente la dirección predominante del gas dióxido de nitrógeno proveniente del SW en relación a la distribución de sus concentraciones para el mes de enero y por períodos horarios que corresponden a los momentos del día en donde se reportan las máximas (09 horas y 20 horas) de 15,5 ppb y 17,4 ppb, respectivamente y mínimas concentraciones (entre 12 y 16 horas horas) de 11,5 ppb.

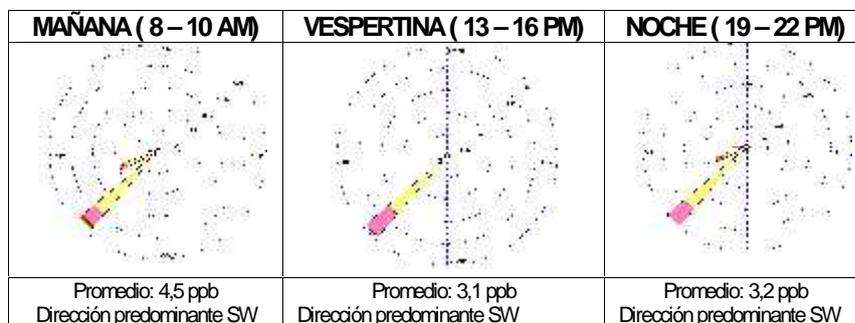
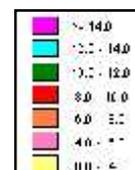


Figura 17. Rosas de Concentración de Dióxido de Azufre – enero 2009



En el **Cuadro N° 4** se muestra el comportamiento semanal de las concentraciones de SO₂. La máxima concentración se presentó el día martes 23 de enero de 34,7 ppb a las 11:00 horas. Hacia el día domingo se registraron en promedio los menores valores, con una media de 1,7 ppb, mostrándose, de forma similar al comportamiento de otros contaminantes, su asociación al desplazamiento humano, con menores concentraciones los días no laborables.

Cuadro N° 4. Estadística semanal de las concentraciones de dióxido de azufre (SO₂) – enero 2009

Día	máximo	día	hora	mínimo	día	hora	promedio
Lunes	9,9	26-ene	13:00	0,0	05 al 12 ene	03 - 06:00	2,4
Martes	8	06-ene	9:00	0,0	27-ene	03 - 06:00	2,8
Miércoles	11,6	14-ene	8:00	0,1	21-ene	5:00	3,2
Jueves	14,3	08-ene	12:00	0,0	08-ene	6:00	2,6
Viernes	13,4	23-ene	11:00	0,0	02-ene	04 - 06:00	3,2
Sábado	10,9	24-ene	11:00	0,1	03-ene	6:00	2,4
Domingo	9,6	25-ene	9:00	0,1	11-ene	7:00	1,6

Asimismo, en la **figura 18** se presenta el comportamiento medio de cada uno de los días de la semana del mes de enero del dióxido de azufre.

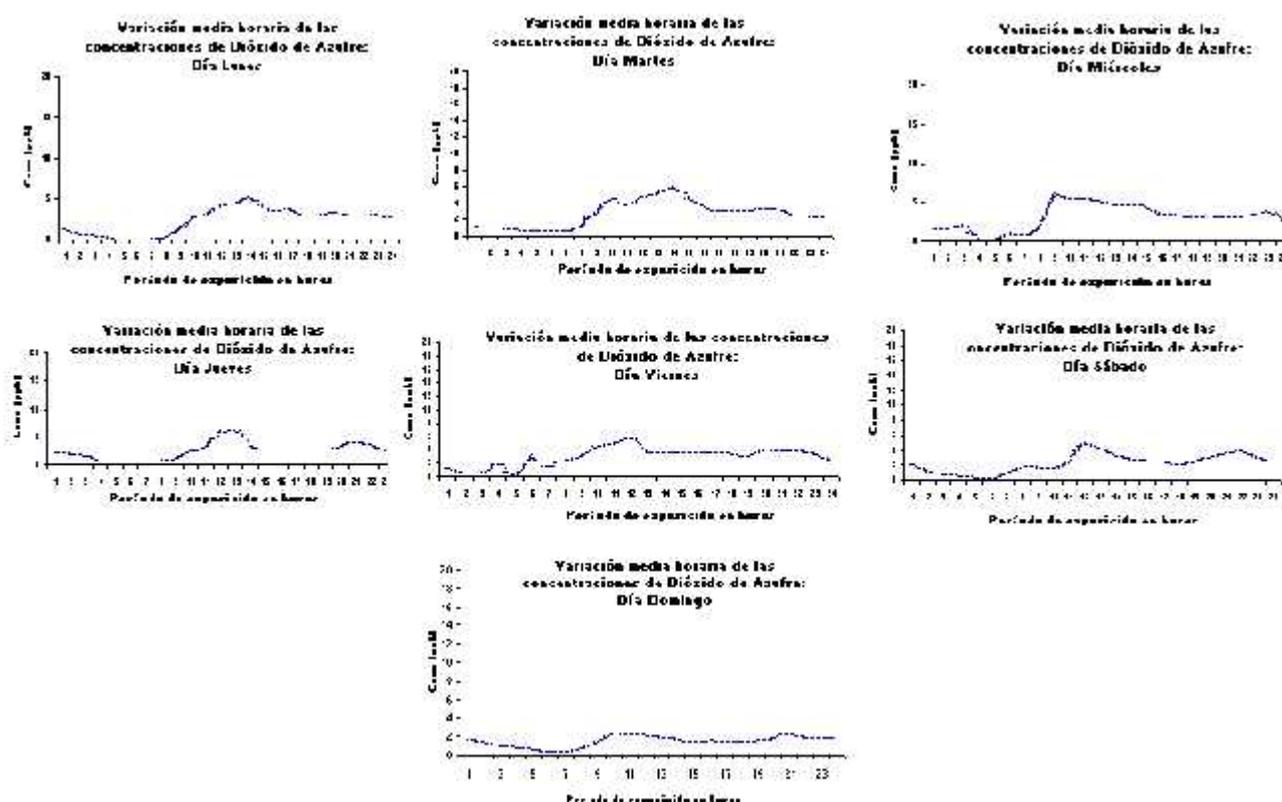


Figura 18. Variación semanal de las concentraciones de dióxido de azufre – enero 2009

3.1.3 De las condiciones meteorológicas

El análisis de las condiciones meteorológicas para la Zona Metropolitana de Lima-Callao durante el mes de enero 2009, se ha realizado en base a información derivada disponible sobre la evolución sinóptica de los sistemas meteorológicos que influyen en el clima de la costa central de Perú, y de la información recopilada de la red de estaciones automáticas descrita en el acápite 2.3.

A continuación se presentan las variables analizadas durante el período de muestreo del polvo atmosférico sedimentable, partículas gruesas y gases contaminantes del aire.

a. De la Nubosidad

De acuerdo a lo presentado en la **figura 18**, el mes de enero 2009, se caracterizó porque la nubosidad estratiforme que se configura por debajo de la base de la inversión térmica por subsidencia, entre superficie y 1000 m.s.n.m., estuvo presente durante algunos días del mes dando condiciones de cielo cubierto a nublado con presencia de fina garúa en las mañanas en los distritos del litoral, variando cerca del medio día y hacia los distritos del este a nublado parcial y nubes dispersas o despejado con presencia de intensa insolación cuando la inversión se rompe o debilita. Asimismo, hacia el mes de enero, lo que se observa es el predominio de la nubosidad media y lata como consecuencia de los trasvases de masas de aire húmedas desde la Amazonía hacia las vertientes occidentales de los Andes, que están ocurriendo con mayor frecuencia y ocasionando mayor pluviosidad en la región.

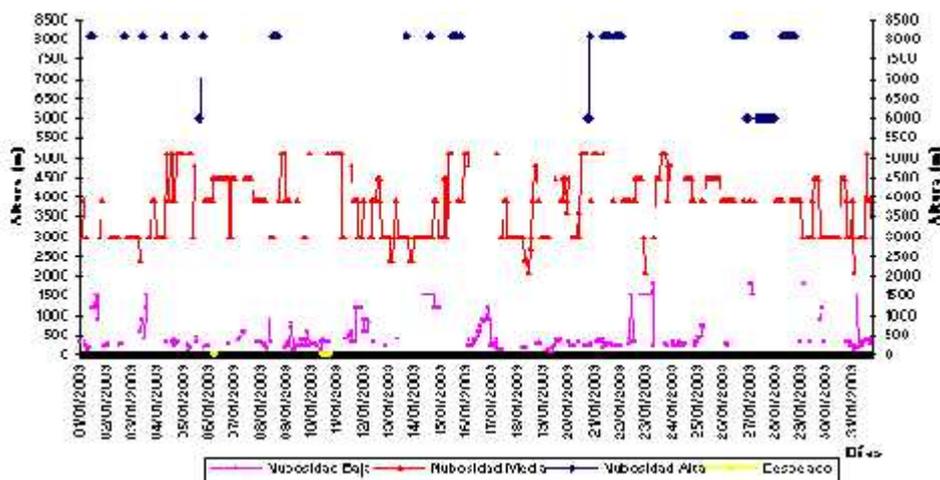


Figura 19. Variación temporal horaria de la Nubosidad en la estación A.I. Jorge Chávez enero 2009

b. De la Temperatura y Humedad Relativa

- El análisis medio mensual de las variables temperatura y humedad relativa de las estaciones analizadas: automática sinóptica y de radiosondaje A.I. Jorge Chávez, automática Campo de Marte y automática La Molina, señala el día domingo 18 de enero como el más cálido con una máxima media de 23,7 ° C y el día domingo 11 como el más frío con un valor medio de 21,0 ° C. Con respecto a la humedad relativa, el día más seco fue el lunes 26 de enero con la mínima media de 77 %, y el más húmedo el jueves 01 de enero (84 %). Ver figura 20.

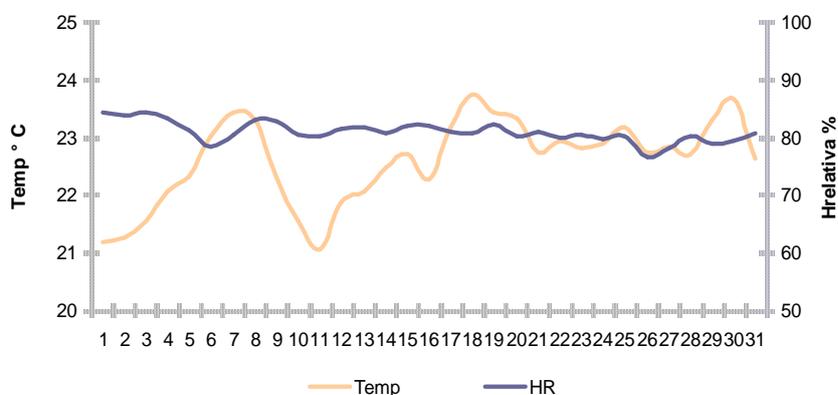


Figura 20- Variación media diaria de la temperatura y humedad relativa durante el mes de enero del 2009 en El Callao, Jesús María y La Molina

- Del análisis de la variación temporal diaria de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%) extremas se observa lo siguiente: la temperatura máxima fluctuó entre los valores de $22,5^{\circ}\text{C}$ en La Molina a $29,1^{\circ}\text{C}$ en Jesús María, y la mínima fluctuó entre $17,6^{\circ}\text{C}$ en La Molina a $22,2^{\circ}\text{C}$ en Jesús María; la temperatura media del mes, considerando las estaciones analizadas, fue de $22,6^{\circ}\text{C}$. En cuanto a las humedades relativas, la máxima fluctuó entre 83% en El Callao a 95% en Jesús María y La Molina; y la mínima osciló entre 55% en El Callao a 78% en Jesús María y La Molina (ver **figura 21**); la humedad relativa media fue de 81% . El mes de enero presentó días con brillo solar desde tempranas horas de la mañana que se mantuvieron hacia el resto de horas del día, con una alta sensación térmica de calor.

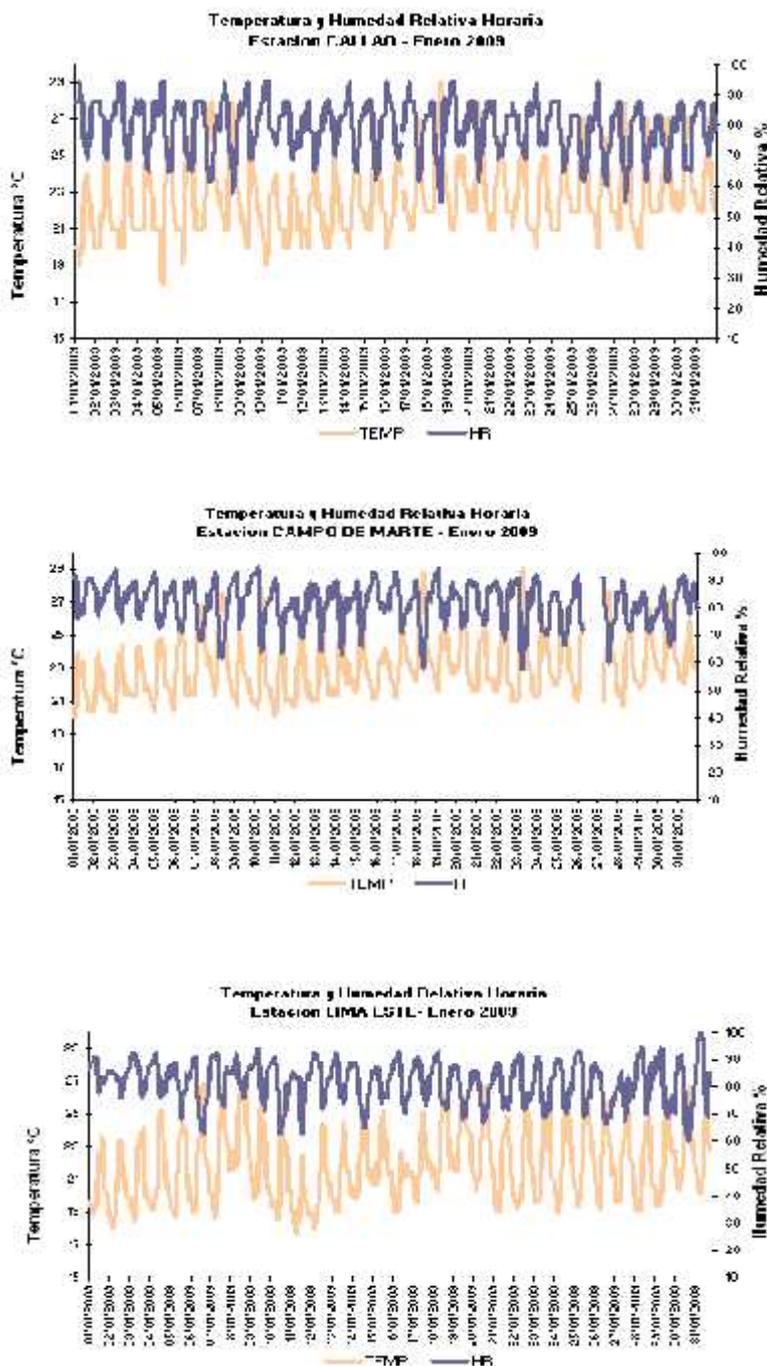
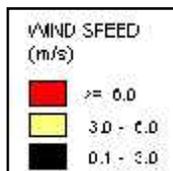
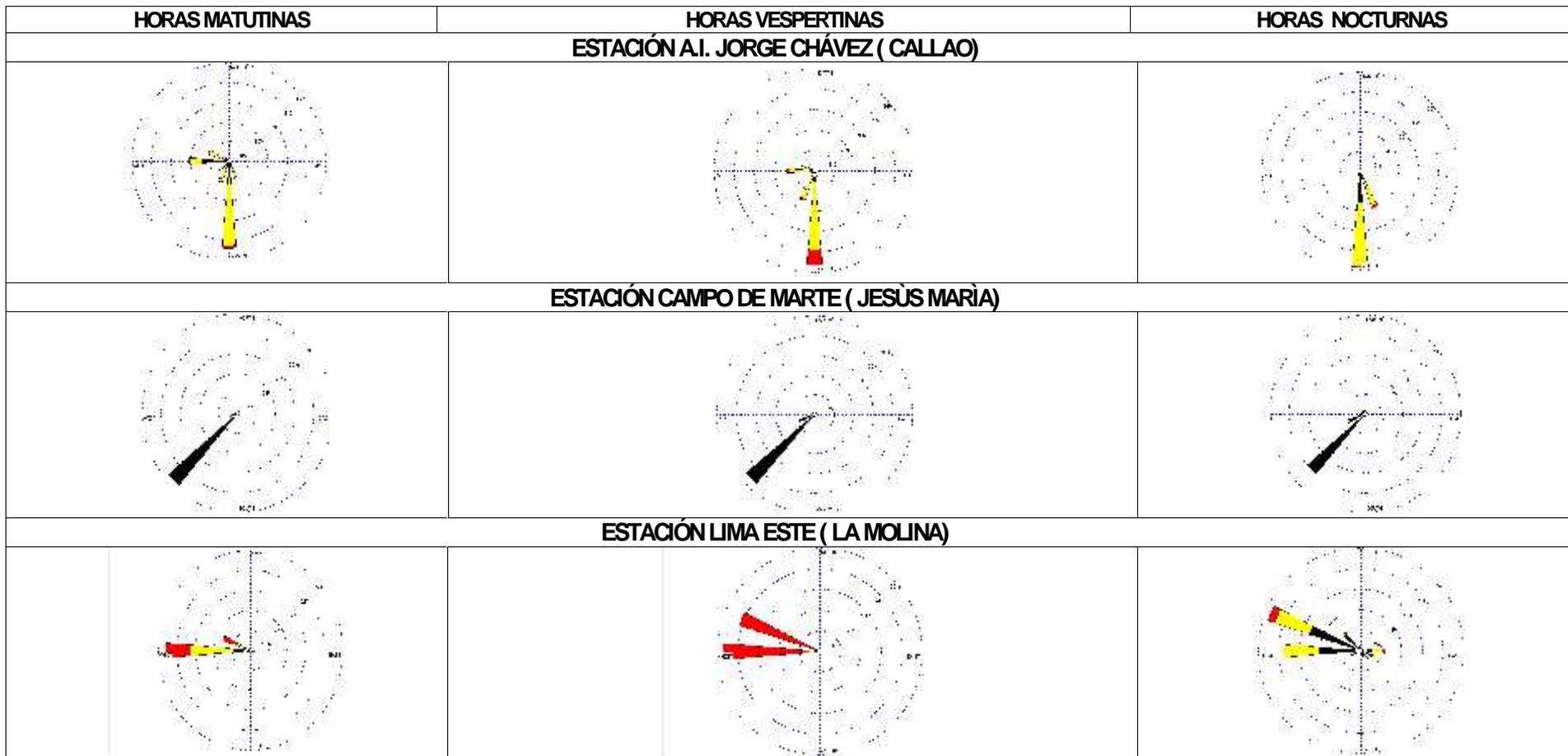


Fig 21 – Variación horaria de la Temperatura y Humedad relativa en las estaciones de El Callao, Jesús María y La Molina - Enero 2009

c. Del viento superficial

La información horaria de viento superficial (velocidad y dirección) correspondiente al mes de enero es presentada en la **figura 22** para el período matutino (07:00 – 11:00), vespertino (12:00 – 18:00) y nocturno (19:00 – 06:00), respectivamente. Este análisis es importante por cuanto esta variable meteorológica influye directamente en los procesos de transporte y dispersión de los contaminantes determinando tanto la localización como los niveles altos o bajos de concentración de éstos.

- Durante el período matutino (7:00 a 11:00 horas), predominaron vientos de intensidad media débil (< 3 m/s) en Jesús María (0,6 m/s) y moderadas en El Callao (3,1 m/s) y La Molina (4,5 m/s). No se registró ocurrencia significativa de calmas (> 20 %).
- Durante el período vespertino (12:00 a 18:00 horas) se registraron vientos de intensidades débiles en Jesús María (0,2 m/s), moderadas en El Callao (4,4 m/s) y fuertes en La Molina (8,2 m/s). Se registró ocurrencia significativa de calmas en la estación Campo de Marte (Jesús María) con 58,6 %.
- Durante el período nocturno (19:00 a 6:00 horas) se registraron vientos de intensidad débil en Jesús María (0,1 m/s) y La Molina (2,5 m/s); mientras que en El Callao se reportaron intensidades moderadas de 3,1 m/s. En la estación Campo de Marte se registró ocurrencia significativa de calmas (80,6 %).
- En cuanto a las direcciones predominantes del viento superficial, en horas matutinas (7:00-11:00 horas) la estación A.I. Jorge Chávez (Callao) reportó direcciones del S (40 %) y W (18 %); manteniéndose en horas vespertinas vientos de componente sur del S (51 %) y SSW (17 %); hacia horas de la noche se presentaron vientos de S y SSE con frecuencias de 63 y 26 %, respectivamente. En la estación Campo de Marte, se presentaron direcciones del SW (66 %) y del WSW (7,0 %) en horas matutinas, manteniéndose en horas vespertinas con frecuencias de 32 y 6 %, y en horas de la noche con frecuencias de 12 y 3 %. En la estación Lima Este, en horas de la mañana predominaron vientos del W (60 %) y WNW (21 %), que se mantuvieron hacia horas vespertinas con frecuencias del 52 y 45 %, respectivamente, y en horas de la noche, con frecuencias de 26 % y 33 %, respectivamente.



**Fig 22 – Rosas de viento (m/s) en las estaciones de El Callao, Jesús María y La Molina
Enero 2009**

d. Del perfil de la troposfera

De acuerdo a la vigilancia sinóptica, utilizando salidas de modelos de NCAR/NCEP y del CPTEC, la evolución de los sistemas atmosférico-oceánicos y terrestres y sus interacciones que influyen en el clima de la costa central de Perú, muestran que el Anticiclón del Pacífico sur-oriental –APS– presentó un comportamiento variable, con núcleo oscilando entre 1016 a 1032 hPa y promedio de 1024 hPa. Relacionado a lo anterior, el fenómeno de la inversión térmica por subsidencia, presentó las características que se muestran en el **Cuadro N° 5**, donde es importante observar la altura de la base de la inversión variando de 237 a 664 msnm, altura media de **358,2 msnm** e intensidad de 1,2°C/m. Asimismo, en la **figura 22**, se ha elegido el diagrama del sondeo del 09 de enero, en donde se puede observar que, el viento entre superficie y 300 hPa fue mayormente del SE, ESE y E con 2 a 5 m/s de velocidad hasta los 500 hPa y más arriba hasta los 300 hPa, 10 a 15 m/s; entre 300 y 200 hPa cambió a vientos del N con velocidades variando entre 5 a 20 m/s; por sobre los 200 hPa los vientos fueron del W con velocidades de hasta 20 m/s.

Cuadro N° 5: Características de la Capa de Inversión Térmica (sondaje de 7:00 AM, hora local) en la Costa Central de Perú, enero 2009

PARÁMETRO	UNIDAD	MÁXIMO		MÍNIMO		PROMEDIO
Espesor	metro	169	17 Ene	27	3 Ene	98
Altura Base	metro	612	16 Ene	180	14 Ene	358,2
Altura Tope	metro	664	16 Ene	237	26 Ene	438,6
T Base	° C	19	14 Ene	12,3	17 Ene	17,2
T Tope	° C	20,8	21 Ene	13,6	17 Ene	18,5
Gradiente	°C/ metro	2,7	16 Ene	0,3	26 Ene	1,2
H.R. Base	%	100	9,17,25 Ene	92	3,12 Ene	98
H.R. Tope	%	97	26,28 Ene	62	2 Ene	83

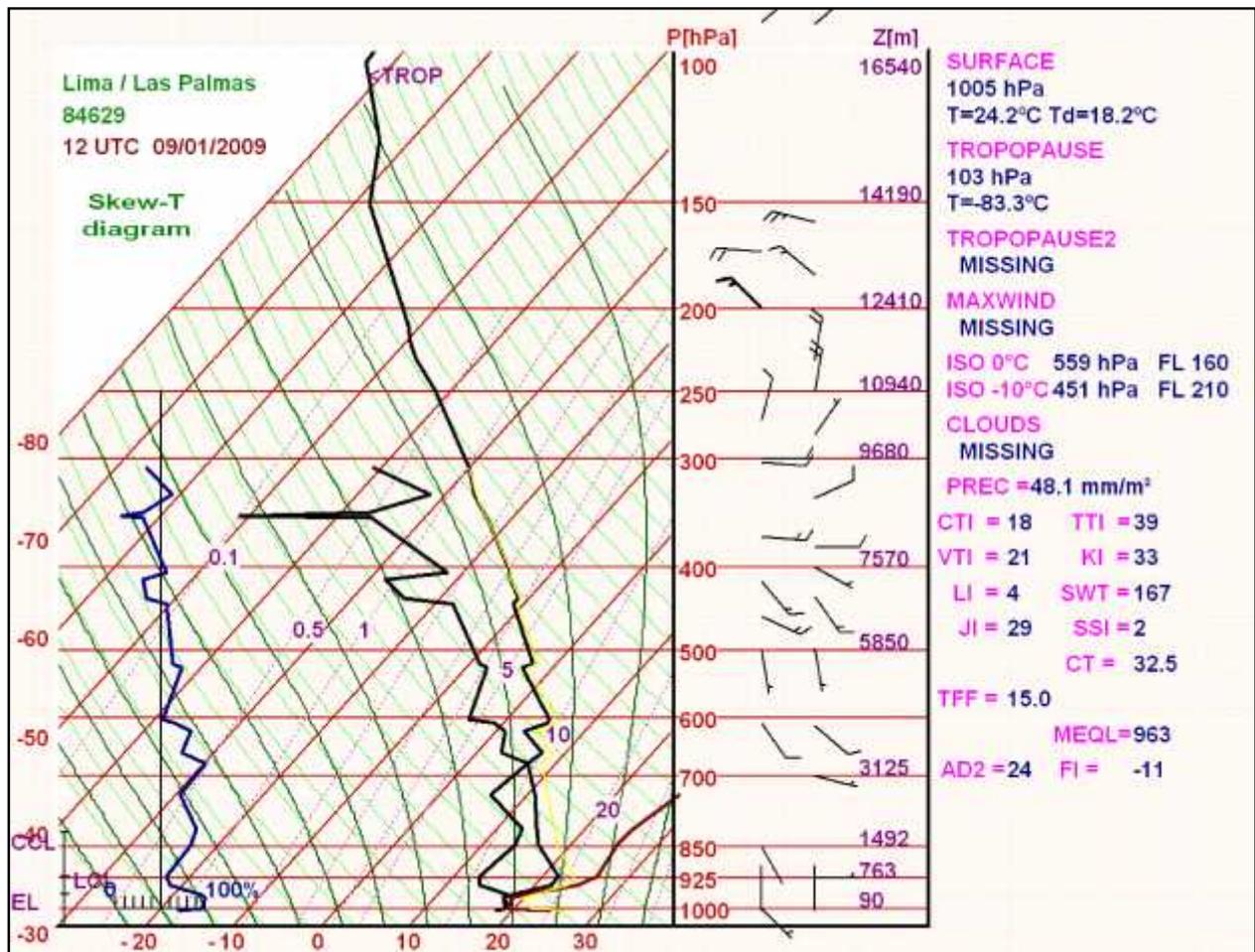


Figura 23.- Radiosondaje del día 09 de enero del 2009 en la Estación de radiosondeo Las Palmas (Surco)

4. Perspectivas Ambientales: Del Polvo Atmosférico Sedimentable

Tomando como referencia las condiciones climáticas de superficie pronosticadas para febrero 2009, el comportamiento de la base de la inversión térmica y las tendencias proporcionadas por modelos estadísticos, se prevé que la media de las concentraciones del polvo atmosférico sedimentable se incrementen en promedio para el mes de febrero. Por ello, se estima que las concentraciones de polvo atmosférico sedimentable para 05 zonas representativas de la capital sean: Lima Norte (Independencia) con 32,4 t/km²/mes, Lima Centro (Cercado I) con 7,0 t/km²/mes, Lima Este (Cercado II/ zona este) con 25,2 t/km²/mes, Lima Oeste (Callao) con 5,8 t/km²/mes y Lima Sur (VMT) con 30,5 t/km²/mes; todas por encima del nivel referencial permisible de la OMS equivalente a 5 t/km²/mes.

5. Conclusiones

- ✓ El material particulado para el mes de enero 2009 presentó el siguiente comportamiento:

En cuanto al Polvo Atmosférico Sedimentable (PAS), los niveles de contaminación en los principales núcleos durante enero fueron en promedio similares a los registrados el mes de diciembre. La configuración resultante fue de 4 centros de alta contaminación: el primer núcleo se presentó en Lima norte con 32,3 t/km².mes; el segundo en Lima centro-este con un valor medio de 24,3 t/km².mes; el tercero en Lima sur-este con 34,5 t/km².mes; y el cuarto en Lima sur con una media de 32,1 t/km².mes.

El 74 % de las estaciones sobrepasaron el nivel referencial establecido por la Organización Mundial de la Salud. La media mensual para las estaciones evaluadas fue de 12,1t/km².mes; el valor máximo registrado fue de 34,5 t/km².mes en Pachacamac y el mínimo de 1,4 t/km².mes en La Molina.

En cuanto al material particulado menor a 10 micras (PM10), la máxima concentración horaria registrada fue de 101 ug/m³ el día viernes 23 de enero a las 9:00 horas. La máxima concentración media diaria de 49,7 ug/m³, correspondió al 33 % del ECA Nacional equivalente a 150 ug/m³ (media aritmética) para 24 horas.

- ✓ En cuanto a los contaminantes gaseosos, se observó lo siguiente:

Las máximas concentraciones de **óxido nítrico (NO)** y **dióxido de nitrógeno (NO₂)** fueron de 99,7 ppb a las 20:00 horas y de 38,0 ppb a las 11:00 horas el día jueves 08 de enero. Las mínimas concentraciones (0 – 2 ppb) se registraron en horas de la madrugada comprendidas entre las 4: 00 y 6:00 horas.

La concentración media de NO₂ para el mes de mayo fue de 13,0 ppb, inferior al mes anterior y la máxima (38,0 ppb) equivalió al 36 % del ECA Nacional horario para este contaminante. Las máximas concentraciones de NO₂ se presentaron los días miércoles y jueves (27,9 y 28,0 ppb, respectivamente); el día domingo la media fue de 10,7 ppb, menor en relación al resto de la semana.

El **dióxido de azufre (SO₂)** registró su valor máximo de 14,3 ppb el día jueves 08 de enero a las 12:00 horas. Se observaron además dos picos horarios máximos de 4,7 ppb a las 11:00 y de 3,4 ppb a las 20:00 horas, coincidiendo de esta manera con las horas de mayor actividad vehicular.

La concentración media diaria mensual de SO₂ para el mes de enero fue de 2,6 ppb y la máxima diaria de 5,4 equivalió al 4 % del ECA Nacional horario para este contaminante.

El día jueves 08 de enero (12:00 horas) se registró la mayor concentración de SO₂ equivalente a 14,3 ppb, mientras que la media del domingo fue de 1,6 ppb.

- ✓ En cuanto a la nubosidad horaria, la nubosidad baja estratiforme presente durante algunos días del mes en los distritos costeros, donde en las mañanas se presentaron condiciones de cielo

cubierto con presencia de fina garúa, variando alrededor del medio día y hacia los distritos del este a condiciones de nublado parcial, nubes dispersas y despejado con presencia de intensa insolación. Asimismo, se mostró un predominio de nubosidad media y alta, producto de los trasvases.

- ✓ El mes de enero se caracterizó por presentar días con brillo solar en horas desde tempranas horas de la mañana, manteniéndose hacia el atardecer. En cuanto al comportamiento de la temperatura y humedad relativa del aire, las medias de las estaciones analizadas en enero fueron de 22,6° C y 81 %. Así mismo el análisis medio señala el día domingo 18 de enero como el más cálido con una máxima media de 23,7 ° C y el día domingo 11 como el más frío con un valor medio de 21,0 ° C. Con respecto a la humedad relativa, el día más seco fue el lunes 26 con la mínima media de 77 %, y el más húmedo el jueves 01 de enero (84 %).
- ✓ Con respecto al análisis de las intensidades del viento superficial en los períodos analizados, en horas matutinas predominaron vientos de intensidad media débil (< 3 m/s), con excepción de El Callao y La Molina con intensidades moderadas (3 – 4 m/s m/s) y sin ocurrencia de calmas significativas; en horas vespertinas se presentaron intensidades medias débiles en Jesús María (0,2 m/s), moderadas en El Callao (4,4 m/s) y fuertes en La Molina (8,2 m/s), con ocurrencia significativa de calmas en Jesús María (59 %); mientras que hacia horas de la noche se registraron intensidades medias débiles en todas las estaciones con excepción de El Callao (3, 1m/s) y con ocurrencia significativa de calmas en Jesús María (80,6 %). En cuanto a las direcciones predominantes, se registraron principalmente vientos de componente sur, con excepción de la estación Lima Este (La Molina) en donde predominaron vientos de componente W.
- ✓ Durante el mes de enero 2009, la inversión térmica por subsidencia presentó un comportamiento muy variable, presente todos los días que se realizó el sondaje, muy debilitada y dando condiciones estables a ligeramente estables, con configuración de su base variando de 237 a 664 msnm, promedio de 502,8 msnm e intensidad de 1.2° C/m

