



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas Oceánicas y Recursos naturales.

“Estimación del nivel de contaminación de material particulado  $PM_{2.5}$  y  $PM_1$  en la ciudad de Guayaquil.”

Trabajo de titulación Previo a la obtención del Título de Magister En Cambio Climático

Presentado por: Ing. Amb. Ildaura Noemí Espín Esparza

Director: Gladys Rincón Ph.D.

Guayaquil – Ecuador, 2017

## **AGRADECIMIENTO**

A mi Directora, Gladys Rincón Ph. D. por su guía, dedicación y sapiencia.

A todos los distinguidos profesores de la Maestría en Cambio Climático, por transmitir sus valiosas enseñanzas y cosmovisiones.

A todas las personas involucradas: Dr. José Luis Santos, Ing. Cesar Delgado, Ing. Guillermo Espín E. y Biol. Dimitri Piedra que ayudaron con sus instalaciones para realizar las mediciones pertinentes.

A mi hermana, Ec. Layla Carolina Espín Esparza por su brillante y desinteresada asesoría.

Y de manera especial, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral por su apoyo holístico en la formación académica y profesional.

## **DEDICATORIA**

A mis queridos padres, Ing. Guillermo Espín Alarcón y Dra. Ildaura Esparza B. por su apoyo y sabios consejos, siendo ellos siempre mi ejemplo de esfuerzo, dedicación y superación.

A mis hermanos, Ing. Guillermo Espín E., Ec. Carolina Espín, Ing. Com. Emilia Espín por su estímulo, afecto, apoyo franco y leal en la consecución de mis objetivos.

A mis adorables sobrinos, para que este trabajo de titulación les sirva de futura motivación y fuente de inspiración ecológica en sus vidas.

## **TRIBUNAL DE GRADUACION**

---

Indira Nolivos Alvarez Ph.D.  
PRESIDENTE DE TRIBUNAL

---

Gladys Rincón Polo Ph.D.  
DIRECTOR DE PROYECTO

---

José Luis Santos Ph.D.

EVALUADOR

## **DECLARACION EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de titulación, corresponde exclusivamente a la autora, y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

---

Ing. Amb. Ildaura Noemi Espin Esparza

## **Resumen**

Debido a los efectos negativos asociados al carbono negro, componente principal que se encuentra en el material particulado fino ( $PM_1$  y  $PM_{2.5}$ ), se realiza esta investigación enfocada a la estimación del nivel de contaminación de material particulado  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  en la Ciudad de Guayaquil. Se midieron las concentraciones de material particulado  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  en la época seca (Octubre a Diciembre 2016) y la época de lluvia (Enero – Marzo 2017), midiendo en simultaneo las variables meteorológicas de temperatura, velocidad y dirección del viento, para cuatro sectores de la ciudad; sector industrial, sector cementero, sector centro, sector residencial. Se identificaron patrones horarios de mayores concentraciones de material particulado, los cuales están influenciados por las actividades antropogénicas de cada sector. Aun cuando las mediciones de material particulado  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  no se muestrearon en simultaneo pero si, una semana consecuyente y bajo condiciones meteorológicas, emisiones, y topográficas similares, se evidencia que existe una correlación moderada positiva del 55% entre los  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  siendo esta menor (47%) en la época de lluvia. Para las variables meteorológicas de temperatura y velocidad del viento con  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$ , se obtiene una correlación leve en la época seca siendo esta menor en la época de lluvia. Se propuso un supuesto en el que se relacionó las  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  con la dirección del viento, resultando la dirección a la cual estaría direccionado el material particulado si estuviera gobernado solo por la dirección del viento. En términos generales la calidad del aire en la Ciudad de Guayaquil es buena, con concentraciones de  $PM_{2.5}$  por debajo de las regulaciones ambientales de la República del Ecuador y los valores sugeridos por la OMS, para las concentraciones de  $PM_1$  aún no existe regulación nacional ni internacional.

Palabras claves:

$PM_1$ ,  $PM_{2.5}$ , Temperatura, Velocidad y Dirección Del Viento, Carbono Negro

## ABSTRACT

Due to the negative effects associated with black carbon, the main component found in fine particulate matter ( $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ ), this research is focused on the estimation of the level of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  particulate matter contamination in the City of Guayaquil.  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  particulate concentrations were measured in the dry season (October to December 2016) and the rainy season (January - March 2017), simultaneously measuring the meteorological variables of temperature, wind speed and direction, to Four sectors of the city; Industrial sector, cement sector, center sector, residential sector. Time patterns of higher concentrations of particulate matter were identified, which are influenced by the anthropogenic activities of each sector. Even though  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  particulate measurements were not sampled simultaneously, but in a consistent week and under similar meteorological, emission and topographic conditions, a consistent positive 55% correlation between  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  was found, being smaller (47%) in the rainy season. For the meteorological variables of temperature and wind speed with  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ , a slight correlation is obtained in the dry season being this minor in the rainy season. An assumption was made in which the  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  were related to the direction of the wind, estimating in which direction the particulate matter would be directed if it were governed only by the direction of the wind. In general terms the air quality in the City of Guayaquil is good, with concentrations of  $PM_{2.5}$  below the environmental regulations of the Republic of Ecuador and the values suggested by the WHO, for  $PM_{10}$  concentrations there is still no national regulation Nor international

Keywords:

$PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , Temperature, Wind Speed and Direction, Black Carbon

## ÍNDICE GENERAL

### CONTENIDO

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	Pág
1. Introduccion.....	11
CAPITULO 2: OBJETIVOS	
2.1 Objetivo general.....	12
2.1 Objetivos específicos .....	12
CAPITULO 3: MARCO TEÓRICO	
3. Marco teorico .....	13
CAPITULO 4: METODOLOGÍA	
4.1 Sector De Estudio.....	19
4.2 Meteorología .....	24
4.3.Equipos y forma de medición .....	26
4.4 Protocolo de muestreo .....	27
4.5. Procesamiento de datos recolectados.....	28
CAPITULO 5: RESULTADOS	
5. Resultados .....	31
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1 Conclusiones.....	52
6.2. Recomendaciones .....	53
BIBLIOGRAFÍA	
7. Bibliografía .....	54

## ANEXOS

8.1 Anexo 1. Gráficos de correlación simple entre variables .....	57
-------------------------------------------------------------------	----

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág
FIGURA 1. Distribucion de las emisiones de carbono negro en funcion de fuente de emision .....	15
FIGURA 2. Ubicación de los puntos de monitoreo en la Ciudad de Guayaquil .....	19
FIGURA 3. Plano del lugar de monitoreo en el Sector Industrial .....	20
FIGURA 4. Sector Centro de la ciudad y sus alrededores .....	21
FIGURA 5. Sector Cementeras, via a la costa. Ubicado al noroeste de Guayaquil ...	22
FIGURA 6. Sector Tipico Residencial. Ciudadela El Paraiso .....	23
FIGURA 7. Registro historico ed la precipitacion mensual en Guayaquil .....	24
FIGURA 8. Registro historico de la temperatura anual en Guayaquil (1970 - 2012)	24
FIGURA 9. Registro historico Rosa de los vientos de Guayaquil .....	25
FIGURA 10. Equipo utilizado para la recoleccion de datos. EPAM 5000 .....	26
FIGURA 11. Anemometro KESTREL utilizado para la recoleccion de datos .....	27
FIGURA 12. Comportamiento diario $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por sector/epoca .....	33
FIGURA 13. Comportamiento diario $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por sector/epoca .....	34
FIGURA 14. Comportamiento diario $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por sector/epoca .....	35
FIGURA 15. Comportamiento diario $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por sector/epoca .....	36
FIGURA 16. Distribucion espacial de los datos totales por PM/epoca .....	38
FIGURA 17. Concentración 24 horas combinadas para sector de $\text{PM}_1$ en la época de lluvia y sequía. ....	40
FIGURA 18. Concentracion 24 horas combinadas para sector de $\text{PM}_{2.5}$ en la época de lluvia y sequía. ....	41
FIGURA 19. Rosa de los vientos por época y sector de monitoreo .....	42

FIGURA 20. Concentraciones de $PM_{10}$ relacionados con la dirección del viento por época .....	44
FIGURA 21. Concentraciones de $PM_{2.5}$ relacionados con la dirección del viento por época .....	45
FIGURA 22. Concentraciones de $PM_{10}$ relacionados con la dirección del viento por época .....	46
FIGURA 23. Concentraciones de $PM_{2.5}$ relacionados con la dirección del viento por época .....	47
FIGURA 24. Correlación en la época seca entre $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ .....	49
FIGURA 25. Correlación en la época lluvia entre $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ .....	50

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág
TABLA I. Norma de Calidad de Aire Ambiente del TULAS Ecuador .....	14
TABLA II. Protocolo de muestreo.....	27
TABLA III. Cronograma de monitoreo de material particulado .....	28
TABLA IV. Correlaciones entre los dos tamaños de partícula, temperatura y velocidad del viento – Época seca .....	49
TABLA V. Correlaciones entre los dos tamaños de partícula, temperatura y velocidad del viento – Época lluvia.....	49

## 1. INTRODUCCIÓN

En los países en desarrollo, la contaminación es resultado del desarrollo no planificado de las industrias, el uso de tecnologías obsoletas en la producción, los servicios y el transporte, la mala calidad del saneamiento básico y el crecimiento urbanístico no planificado (PNCA, 2010). Las sustancias que pueden ser transportadas por el aire y que afectan la salud de las personas son consideradas contaminantes de criterio del aire (USEPA, 2003). Uno de estos contaminantes es el material particulado (PM, por sus siglas en inglés, particulate matter); el cual es un conjunto de partículas -sólidas y líquidas-, de tamaños microscópicos, suspendidas en la atmósfera (USEPA, 2003), de origen natural o antropogénico que altera la composición y la calidad del aire de un área geográfica, provocando daños a la salud humana y al ambiente en general (USEPA, 2012; PNUMA, 2012). Estas partículas tienen diferentes tamaños, entre esos tamaños están las  $PM_{2.5}$ , con un diámetro equivalente menor a 2,5 micrómetros, normalmente generadas en los procesos de combustión (CCAC, 2012). De menor tamaño están las  $PM_1$ , con diámetro equivalente menores a 1 micrómetro y gran contenido de carbono negro.

El carbono negro se genera en la combustión incompleta de combustibles fósiles, biomasa, incendios forestales e industria (USEPA, 2012) y absorbe la radiación del espectro electromagnético y la irradia como energía calorífica. (Lamarque *et al.*, 2010). Su tiempo de permanencia en la atmósfera es de pocos días a unas cuantas semanas (Quinn *et al.*, 2011). Estudios sugieren su reducción en la atmósfera como una vía más eficiente de mitigar el calentamiento global (AIDA, 2011). Entre los efectos del forzamiento radiativo directo se incluyen no solamente aumentos en la temperatura sino además, modificaciones en los patrones de lluvia y en la visibilidad. (Secretaría del medio ambiente del Gobierno del estado de México, 2010).

Una institución ecuatoriana dedicada a estudios de calidad de aire (Efficacitas, 2007) presentó un informe a la Muy Ilustre Municipalidad de Guayaquil en el cual estimó la cantidad de contaminantes emitidos desde fuentes fijas o estacionarias y desde fuentes móviles obteniéndose un registro de 21.667 t de  $SO_2$ /año, 27.221 t de  $NO_x$ /año, 59.740 t  $CO$ /año, 20.038 t de  $PM$ /año y 23.381 t de  $COV$ /año. Otro trabajo sobre fuentes de emisiones, realizado por Espín (2011), muestra datos de diferentes rutas ubicadas en la periferia urbana de Guayaquil. En total, se registraron 26.147 t/año de  $PM_{10}$  presentes en Guayaquil a lo largo del día.

Por medio de este estudio se pretende estimar los niveles de contaminación de material particulado  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  en la ciudad Guayaquil, como base de información de las concentraciones de material particulado fino, que por su alto contenido de carbono negro, agrava el cambio climático en el Ecuador. Se realizó una serie de muestreos en época seca y de lluvia, identificando la posible remoción de material particulado en la atmósfera debido al fenómeno natural de la lluvia que se presenta en la estación húmeda.

## **2. OBJETIVOS**

### ***2.1 Objetivo general***

Evaluar el nivel de material particulado  $PM_{2.5}$  y  $PM_1$  en zonas emblemáticas por contaminación en la ciudad de Guayaquil, que permitan mejorar los estimados realizados en la Tercera Comunicación Nacional

### ***2.1.1 Objetivos específicos***

1. Diseñar el protocolo de toma de muestras, usando el equipo EPAM SKC-5000
2. Planificar y realizar un monitoreo de material particulado  $PM_{2.5}$  y  $PM_1$  en los puntos a seleccionar.
3. Evaluar las condiciones atmosféricas mediante la recopilación de información meteorológica, los días que se realicen los monitoreos de material particulado, estos resultados se correlacionaran con las muestras de material particulado
4. Evaluar los niveles preliminares de contaminación de material particulado.

### 3. MARCO TEÓRICO

La contaminación del aire constituye en la actualidad un problema ambiental de las zonas urbanas (industrias y viviendas) en el mundo, tanto en los países desarrollados como en aquellos en vías de desarrollo; en los primeros, causada por un alto volumen y diversificación de la producción industrial y un flujo intenso de vehículos automotores y bajos sistemas de control, mientras que en los segundos por causa de un desarrollo no planificado de las industrias, el uso de tecnologías obsoletas en la producción, los servicios y el transporte, la mala calidad del saneamiento básico y el crecimiento urbanístico no planificado (PNCA, 2010).

La contaminación atmosférica es el producto de la liberación de sustancias a la atmósfera que modifican la composición física, química y biológica (TULAS, 2015), además de aquellas sustancias producto de la quema de biomasa de los residuos de cultivos de arroz, ciclo corto, caña, causando concentraciones con suficientes contaminantes en invierno y verano. Los contaminantes son cualquier sustancia emitida a la atmósfera, sea por actividad humana o por procesos naturales, que afecta adversamente a la salud del hombre o al ambiente (TULAS, 2015).

La USEPA (2003), define como gases de efecto de invernadero (GEI) a aquellos gases integrantes de la atmósfera, de origen natural y/o antropogénico, que absorben y re-emiten radiación en determinadas longitudes de ondas del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera, y las nubes: esta propiedad causa el efecto invernadero. El efecto invernadero tiene un componente natural y uno antropogénico, en el cual los GEI actúan como un manto alrededor de l planeta Tierra, atrapando la energía en la atmósfera (absorbe-retorna) alterando el balance energético que permite el control de temperatura, humedad y otros factores ambientales, que garantizan un rango de temperatura optima en el planeta. Los GEI se establecen por su poder calorífico, es decir, capacidad de absorber calor.

Los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre son: vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), metano ( $CH_4$ ), ozono ( $O_3$ ), halo carbonos y carbono negro de las partículas.

El dióxido de carbono es un gas de origen natural y también, subproducto de la quema de combustibles fósiles (hidrocarburos, gas natural o carbón), quema de biomasa, del cambio de uso del suelo y otros procesos industriales (por ejemplo, producción de cemento). Es el principal gas de efecto invernadero antropogénico que afecta al equilibrio radiactivo de la Tierra y es el gas utilizado como referencia para medir otros gases de efecto invernadero, por lo que su potencial de calentamiento global se estableció igual a 1 (Factor  $CO_2$ , 2014). El dióxido de carbono puede permanecer en la atmósfera por casi un siglo por lo cual la Tierra continuara calentándose en las próximas décadas.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011), el material particulado ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_1$ ) consiste en una compleja mezcla de partículas líquidas y sólidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire. Las partículas se clasifican, en función de su diámetro aerodinámico equivalente, en  $PM_{10}$  (partículas con un diámetro aerodinámico inferior o igual a  $10\ \mu m$ ),  $PM_{2.5}$  (diámetro aerodinámico inferior a  $2,5\ \mu m$ ),  $PM_1$  (diámetro aerodinámico inferior a  $1\ \mu m$ ) caracterizado por su alto contenido de carbono negro. El nivel máximo de concentración sugerido por la OMS (2005) en 24 horas de  $PM_{2.5}$  es de  $25\ \mu g/m^3$ .

En Ecuador, los límites máximos permisibles para la concentración de contaminantes comunes a nivel del suelo, están regulados por la Norma de Calidad de Aire Ambiente, Anexo 4 del Libro VI de la Calidad del Aire, perteneciente al Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundario del Ecuador (AM 069, 2016), cuyos parámetros de control podemos ver detallados en la Tabla 1. En esta investigación se usa como referente la regulación de la República de Ecuador para  $PM_{2.5}$ . Se ha establecido que el promedio aritmético de la concentración de  $PM_{2.5}$  de monitoreo continuo durante 24 horas, no deberá exceder de cincuenta microgramos por metro cúbico ( $50\ \mu g/m^3$ ).

De acuerdo con el Instituto de Gobernanza y Desarrollo Sostenible de Estados Unidos ((IGSD/INECE,2008), por sus siglas en inglés) las emisiones de Carbono Negro constituyen la segunda mayor contribución al cambio climático, por debajo del  $CO_2$  por lo que la reducción de emisiones de carbono negro podría ayudar a que el sistema climático no sobrepase los puntos límites que contribuyen al cambio climático, que entre sus consecuencias están; cambios bruscos en el clima, subida del nivel del mar producto del deshielo de Groenlandia y / o capas de hielo de la Antártida, entre otros.

**Tabla I.** Norma de Calidad de Aire Ambiente del TULAS Ecuador.

Contaminante*	Tiempo (horas)	Concentración ( $\mu g/m^3$ )
Monóxido de carbono, CO	8	10.000
Oxidantes fotoquímicos, $O_3$	8	100
Óxidos de nitrógeno, $NO_x$	1	200
Dióxido de azufre $SO_2$	24	125
Material particulado, $PM_{10}$	24	100
Material particulado, $PM_{2.5}$	24	50

\*Valores de concentración expresados a condiciones de  $25^\circ C$  y  $760\ mm\ Hg$ .

**Fuente:** MAE (2016)

El carbono negro (BC por sus siglas en inglés, “Black Carbon”) es el componente con más potencial como absorbente de la luz que constituye al material particulado (PM). Es la forma más eficaz de PM en absorber la energía solar (por unidad de masa en la atmósfera, BC puede absorber un millón de veces más energía que el dióxido de carbono). Se forma por la combustión incompleta de combustibles fósiles,

biocombustibles y biomasa. El BC es emitido directamente a la atmósfera en forma de partículas, siendo el componente principal del "hollín" el cual también contiene algo de carbono orgánico (OC) (USEPA, 2016).

La Dra. Tami Bond de la universidad de Illinois. (IGSD/INECE, 2008) estimó la distribución de las fuentes de emisiones de carbono negro para Estados Unidos como se puede observar en la figura 1. La figura 1 indica que el 42% de BC proviene de la quema de biomasa (quema de bosques y sabanas), 18% de la quema de biofuel en residencias con tecnologías tradicionales, 14% de la quema de motores de diésel en el transporte, 10% de la quema de motores de diésel para uso industrial, 10% de procesos industriales y generación de energía, 6% de la quema de carbono en residencias con tecnologías tradicionales.

Se destaca que esta distribución de las emisiones de carbono negro en función de fuentes de emisión expuesta por Bond (2007), es para un país desarrollado con 4 estaciones del año, esto se debe a la inclinación del eje de giro de la tierra respecto al plano de su órbita respecto al Sol, que hace que algunas regiones reciban distinta cantidad de luz solar según la época del año. En las regiones ecuatoriales, solo se presenta dos estaciones (seca y lluviosa) (Noel de Nevers, 1998) por lo cual la distribución de emisiones de BC debe ser diferente.

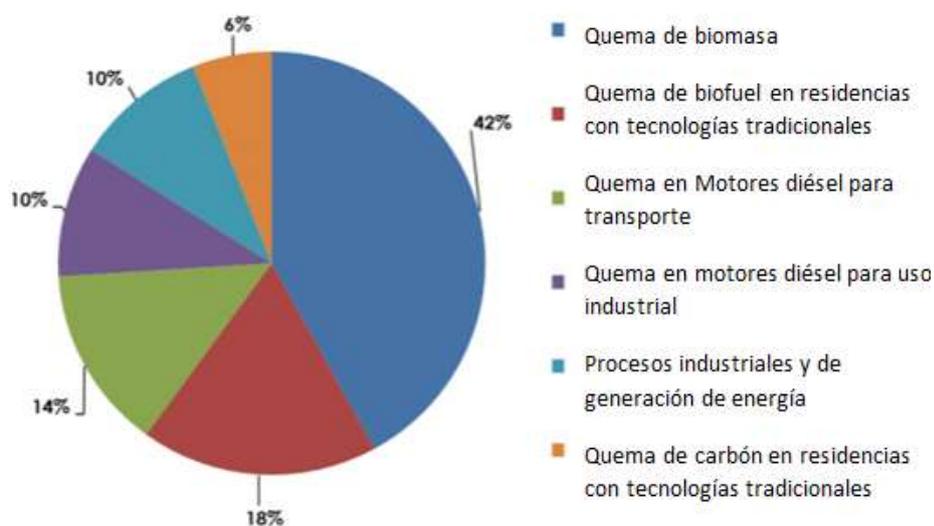


Figura 1. Distribución de las emisiones de carbono negro en función de fuente de emisión.

Fuente: Bond (2007)

La meteorología ayuda a comprender la interacción de la atmosfera con otros subsistemas, en los que se analizan los siguientes parámetros: la temperatura, magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico; la presión atmosférica; la humedad relativa, mide la cantidad de agua en el aire en forma de vapor, comparándolo con la cantidad máxima de agua que puede ser mantenida a una temperatura dada; el viento con dos parámetros de medición: velocidad,

intensidad del viento y dirección, registra desde donde proviene. Así mismo, la orografía es un parámetro a considerar cuando se trata de analizar el viento.

La Tercera Comunicación Nacional del Cambio Climático en Ecuador es un proyecto que se enmarca en el cumplimiento de los compromisos adquiridos ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), con el cual se pretende superar retos cualitativos importantes como es la elaboración del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero con el fin de ser capaces de reducir la posibilidad de conflictos y riesgo de desastres naturales incluyendo el Cambio Climático (PNUD, 3CN y BUR, 2014). Por lo cual, la pertinencia de esta investigación que se fundamenta en el monitoreo de las emisiones de material particulado fino en dos tamaños de partículas: PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>1</sub>.

En la ciudad de Mendoza, Argentina, se realizaron monitoreos de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>1</sub> y, velocidad y dirección del viento en diferentes lugares de la misma (cinco puntos) enfocadas para analizar las concentraciones en el área urbana y suburbana e indagar sobre fuentes de emisiones, patrones diarios y horarios de concentraciones de estos PM. Esta investigación concluye que la concentración de partículas durante el periodo de monitoreo está fuertemente asociada a las actividades urbanas y a la meteorología. Teniendo como resultado que en las zonas céntricas y residenciales las concentraciones de material particulado están influenciadas por la actividad vehicular, y verificando episodios particulares de contaminación en sitios más alejados del centro, los cuales se ven afectados por el transporte de partículas en el aire debido a la meteorología (Allende et al, 2014).

En un sitio urbano de Barcelona, España, se realizó un monitoreo para obtener las mediciones de la concentración del número de partículas (N), carbono negro (BC) y, los niveles de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>1</sub>. La variabilidad diaria de todos los parámetros de monitoreo de aerosoles estuvo muy influenciada por las emisiones del tráfico vial y la meteorología. Los niveles de N, BC, PM<sub>x</sub>, CO, NO y NO<sub>2</sub> aumentaron durante los picos de mayor tráfico vehicular, reflejando las emisiones desde los vehículos, y la disminución de éstas durante el día por el efecto de las brisas o la reducción de la intensidad del tráfico. Los niveles de PM<sub>2.5-10</sub> no disminuyeron durante el día como resultado de la resuspensión del polvo por el tráfico y el viento. El número de partículas (N) mostró un segundo pico, registrado en la tarde y paralelo a los niveles de O<sub>3</sub> y la intensidad de la radiación solar, que puede atribuirse a la nucleación fotoquímica de gases precursores. Se observó una tendencia creciente entre 1999 y 2006 para los niveles de PM<sub>1</sub>, relacionada con el aumento del flujo de tráfico y la flota de diésel en Barcelona. La composición de los PM estuvo muy influenciada por las emisiones del tráfico rodado, siendo las emisiones de escape una importante fuente de PM<sub>1</sub> y los procesos de resuspensión de polvo de PM<sub>2.5-10</sub> (Pérez et al 2010).

Se han realizado estudios de monitoreo de carbono negro para medir su concentración en aire ambiente. En las delegaciones Merced y Coyoacán, en el Distrito Federal, Retama, Rivera, Aldape *et ál.* (2004) registraron concentraciones promedio de 1.3

$\mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente; también encontraron una correlación entre el carbono negro y los patrones de tráfico: los picos de concentración coinciden con las horas pico del tráfico vehicular. (Secretaría del medio ambiente del Gobierno del estado de México, 2010)

Se ha realizado el estudio de la influencia de la circulación de la brisa marina y de las emisiones primarias del tráfico por carretera sobre la relación entre el número de aerosoles urbanos ( $\text{PM}_3$ , partículas  $> 3 \text{ nm}$ ), carbono negro  $<10 \mu\text{m}$  (BC),  $\text{PM}_1$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{2.5-10}$  ( $\text{PM}_x$ ) en una ciudad costera (Santa Cruz de Tenerife, Islas Canarias). Los ciclos diarios de brisas marinas y de montaña (interior durante el día y hacia el mar en la noche) y las emisiones del tráfico rodado ejercieron una gran influencia bien diferenciada en las concentraciones de BC,  $\text{PM}_3$  y  $\text{PM}_x$ . En este escenario, se observaron los siguientes rasgos principales de aerosol: (1) las emisiones de escape de vehículos frescos dieron lugar a altas concentraciones de BC y  $\text{PM}_3$ , de tal manera que estas dos métricas aumentaron con la intensidad de tráfico (vehículos); (2) los niveles de  $\text{PM}_1$  y  $\text{PM}_{2.5}$  fueron más bajos durante la luz del día (debido a la entrada de masas de aire marinas relativamente limpias) que durante la noche (debido al flujo de aire de drenaje hacia el mar que ocasiona el transporte de contaminantes particulados envejecidos de la ciudad); (3) aunque las concentraciones de  $\text{PM}_3$  y BC mostraron una correlación significativa durante todo el período de estudio, la relación  $\text{PM}_3 / \text{BC}$  experimentó una evolución diaria con un máximo durante la luz del día. Por lo tanto, se registraron altas concentraciones de  $\text{PM}_3$  asociadas con elevadas relaciones  $\text{PM}_3 / \text{BC}$  y altas condiciones de irradiación solar durante el período de brisa interior de la luz del día, debido a una mejora de los procesos que favorecen la formación de nuevas partículas. El análisis de datos señala que esta mejora en los nuevos procesos de formación de partículas está fuertemente relacionada con la nucleación de vapores fotooxidados bajo las relativamente bajas concentraciones de  $\text{PM}_x$  (y, por consiguiente, bajo área de aerosol) provocadas por la entrada interior de aire marino limpio debido a la brisa. Los resultados obtenidos muestran que, además de las emisiones de escape del vehículo, la formación de nuevas partículas en zonas urbanas costeras es debido a procesos de fotooxidación que puede contribuir significativamente a la concentración de partículas ultrafinas (Rodríguez et al 2008).

Se realizó un estudio de correlación entre el material particulado  $\text{PM}_{2.5}$  y las variables meteorológicas en Estados Unidos, con implicaciones de la sensibilidad del  $\text{PM}_{2.5}$  hacia el cambio climático, mediante la aplicación de un modelo de regresión lineal múltiple (MLR) para estudiar las correlaciones de  $\text{PM}_{2.5}$  total y sus componentes con variables meteorológicas utilizando un registro de observación de 11 años (1998-2008). Los datos fueron procesados por estaciones para centrarse en las correlaciones de escala sinóptica. Se encontró que la variación diaria en la meteorología descrita por la MLR puede explicar hasta el 50% de la variabilidad de  $\text{PM}_{2.5}$  con temperatura, humedad relativa (RH), precipitación y circulación, siendo todos factores predictivos importantes. La temperatura está positivamente correlacionada con sulfato, carbono orgánico (OC) y carbono elemental (EC) casi en todas partes. La correlación del

nitrate con la temperatura es negativa en el Sudeste pero positiva en California y en las Grandes Llanuras. RH está positivamente correlacionada con sulfato y nitrato, pero negativamente con OC y EC. La precipitación está fuertemente correlacionada en forma negativa con todos los componentes de PM<sub>2.5</sub>. Las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> son en promedio 2,6 µg/m<sup>-3</sup> más altas en los días estancados vs. no estancados. Las correlaciones observadas proporcionan una prueba para los modelos de transporte químico utilizados para simular la sensibilidad de PM<sub>2.5</sub> al cambio climático. Señalan la importancia de representar adecuadamente la dependencia de la temperatura de las emisiones agrícolas, biogénicas y de incendios forestales en estos modelos. (Tai, A. P., Mickley, L. J., & Jacob, D. J. ,2010).

Un estudio realizado en Santiago de Chile estudia la estimación de masa total de contaminantes atmosféricos removidos por el agua de rocío y la lluvia durante el periodo de 1995-1999. Este estudio indica que la importancia relativa de ambos tipos de remociones depende fundamentalmente del nivel de lluvias. Los contaminantes atmosféricos pueden ser removidos eficientemente por deposiciones húmedas, proceso que está relacionado con nubes y lluvias e implica una interacción de las gotas de agua con las sustancias contaminantes presentes en la atmósfera y por deposiciones secas o absorción por superficies, por ejemplo en rocío, sólo se detectan los contaminantes presentes en la atmósfera cercana al sitio de colección y su eficiencia depende de la interacción entre los contaminantes y las superficies. (Rubio, M. A., Lissi, E., Riveros, V., & Paez, M. A., 2001).

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Sector de estudio

Los puntos de muestreo seleccionados en Guayaquil para recolectar  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  corresponden al; Sector Industrial, Centro Ciudad, Sector Cementeras Vía La Costa y Sector Residencial. En la figura 2 se observa un extracto de la ciudad de Guayaquil tomado en formato WMS (en sus siglas en inglés, Web Map Service) de uso libre (Ortofoto del instituto geográfico militar del Ecuador), con acercamientos de los cuatro puntos de muestreo seleccionados para esta investigación. En la figura se observa que al Norte se ubica el punto de muestreo correspondiente al Sector Industrial caracterizado por tener una alta demanda comercial – industrial, que además está ubicado entre las principales autopistas de la ciudad de Guayaquil. Al Sureste se encuentra el lugar de muestreo de Centro Ciudad, caracterizado por alto tráfico vehicular y poseer fuerte actividad comercial y residencial. Al Noroeste se encuentran las cementeras en la Vía a la Costa (Sector Cementeras): única autopista con salida/entrada de la ciudad hacia la zona costera. Al Noreste se localiza el punto de muestreo en una típica zona residencial (Sector Residencial) junto a una elevación montañosa denominada Bosque Seco Protector El Paraíso, que ocupa un área de 299 hectáreas y alcanza aproximadamente unos 200 msnm, este sector tiene una alta densidad poblacional con institutos educativos, iglesias, comercios y una vía con alta demanda vehicular.

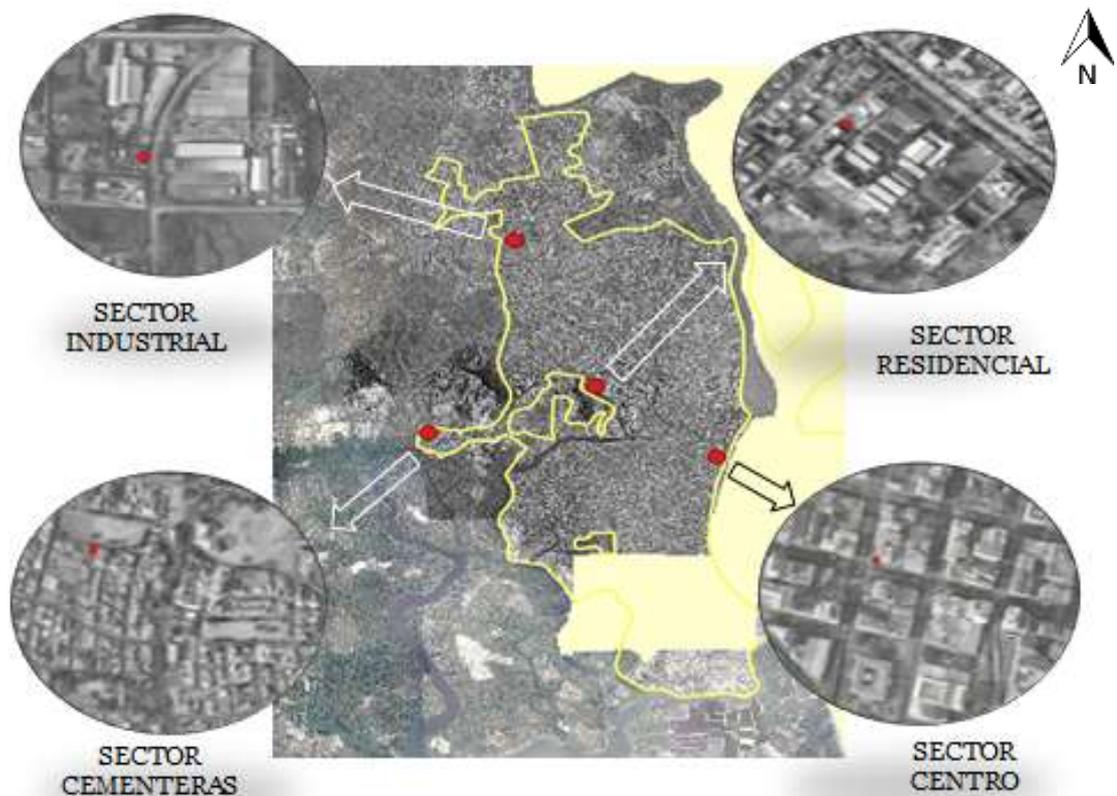


Figura 2. Ubicación de los puntos de monitoreo en la Ciudad de Guayaquil

Ref. IGM (1980)

- **Sector Industrial**

El sector industrial se encuentra circunscrito entre la Vía Perimetral y la Vía a Daule, más conocido como sector industrial INMACONSA. Este sector presenta una alta actividad industrial (industrias medias y pequeñas) en conjunto con una alta actividad comercial, mezclado con zonas residenciales aledañas que exigen los servicios característicos de estas zonas. En detalle posee un parque comercial denominado “Parque California”, en el que se encuentran locales comerciales de venta de ropa, electrodomésticos, implementos para el hogar y alimentos, así como locales bancarios y farmacias. Además posee estaciones de servicio (gasolinera), zonas de bodegas, empresas de importación y venta de productos (Tratomaq S.A.), Empacadoras (Aromali S.A., Zambritisa), fabricación de maquinaria agrícola, industrial, agroindustrial, marina, construcción y para la minería (Mecanos S.A.), producción de mezcla asfáltica elaborada en caliente (Inductroc), alquiler de maquinaria de construcción, fábrica de maquillajes y perfumes, producción de jugos (Yupi, Profrutas), venta de materiales de construcción (EstrucutrasKlaere, Cedimport S.A, Incable, Poligrup, Nutec, Torplas S.A., Metain), producción de productos químicos (Cipeq Cia. Ltda, Provequim, Quimiser S.A.), Plásticos (Proceplas, Trilex), producción de productos alimenticios (Platayuc Cia. Ltda., Frigopesca, Tropicalimentos S.A. Facundo, Corporación Azende), fábrica de alfombras, empresas constructoras, bodegas de usos varios, fábrica de pinturas (Sailorpaint, Ecuanoel), producción de plásticos (PlastiUniversal S.A.), Empresa recicladora (Intercia), de la misma manera ese sector posee institutos educativos, mini Markets, iglesias, etc. (ver Figura 3).

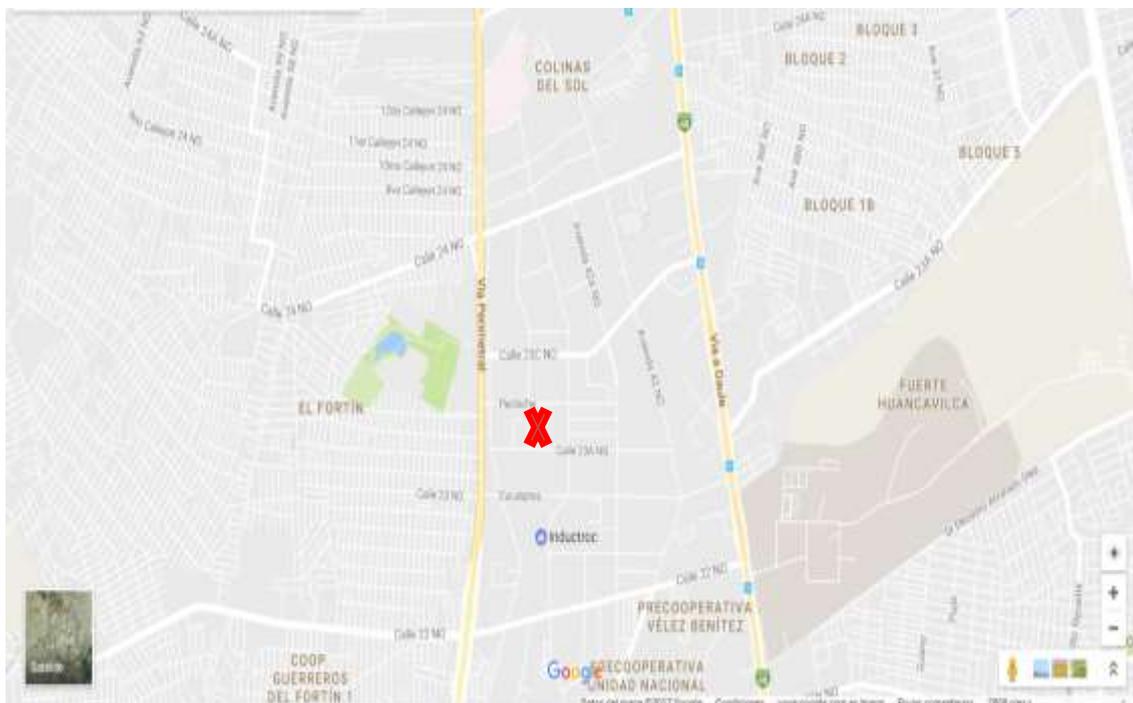


Figura 3. Plano del lugar de monitoreo en el Sector Industrial

Fuente: Google Maps (2016)

En la Figura 3 se indica con una “x” en rojo el lugar exacto del punto de muestreo ubicado en la industria Inductroc. Esta industria está dedicada a la elaboración de asfalto caliente y cuentan con una planta en el sitio. Esta planta tiene un sistema de trampa de emisiones para disminuir las emisiones de material particulado a la atmosfera.

- **Sector Centro Ciudad**

El punto de muestreo Centro Ciudad se encuentra en la terraza de un edificio de viviendas entre las Calles Colon y Chimborazo. El centro de la ciudad de Guayaquil posee gran movimiento comercial en conjunto con viviendas y una alta densidad vehicular. Según información mostrada en el Diario El Telégrafo (2010) y el Diario El Universo (2015), las horas de mayor tráfico vehicular en este sector comienzan a las 18h00, con alto flujo de buses públicos y autos particulares (aproximadamente 350.000) que transitan por estrechas calles. La Figura 4 muestra la localización exacta del punto de muestreo Centro Ciudad (con “x” en rojo). En ella se resaltan en colores el nivel del tráfico vehicular a las 18:00 horas de un día entre semana. En él se puede ver que la mayoría de las calles indican la presencia de tráfico muy lento (líneas rojas).

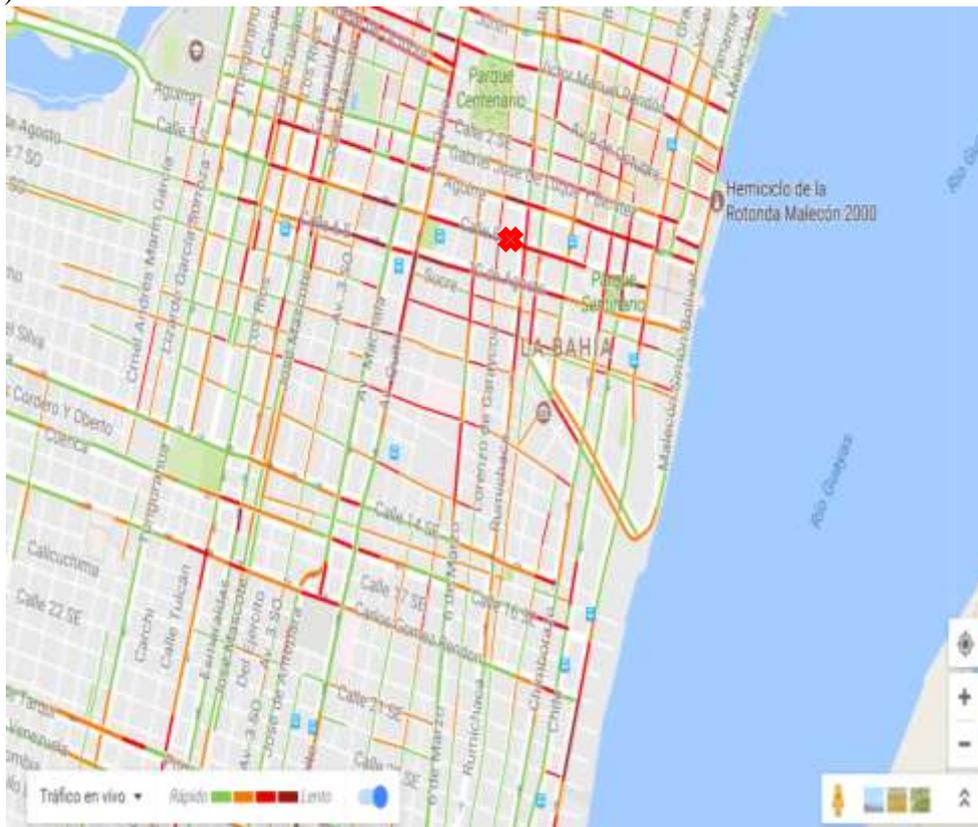


Figura 4. Sector Centro de la ciudad y sus alrededores.

Nota: Se destacan en rojo las vías con alto tráfico vehicular y en verde las de bajo tráfico vehicular el 12-05-2017 Hora: 18h15

Fuente: Google Maps

- **Sector Cementeras**

Sector cementeras localizado en la vía la costa al noroeste de la ciudad. Este sector está atravesado por la carretera vía la costa que es la única vía de ingreso o salida de la ciudad hacia la costa, lo cual hace que tenga un alto tráfico vehicular con vehículos pesados y livianos durante el día y la noche. En esta zona están localizadas dos importantes cementeras de capacidades de operación 900.000 t/año (Chimborazo, 2012) y 5.4 millones de t/año (Holcim, 2015). Se debe recalcar que existen otras cementeras en la zona pero de menor producción (cerca de 400.000 t/año) además, se encuentran canteras a cielo abierto, siendo las principales: Explosa, Canteras San Luis S.A., Calizas y minerales Calmosacor, A los lados de la vía la costa se encuentra una serie de urbanizaciones, unidades educativas, conjuntos habitacionales y locales comerciales. La estación de muestreo está localizada en la urbanización Puerto Azul bajo la influencia de las industrias cementeras, pequeñas canteras y cercana a la autopista, La cementera y cantera más cercana están a 2.5 km de distancia del sitio de monitoreo y además, a 2 km de distancia se encuentra la Planta Eléctrica de Guayaquil – Salitral. La Figura 5 muestra la localización exacta del punto de muestreo señalado con una “x” en rojo.

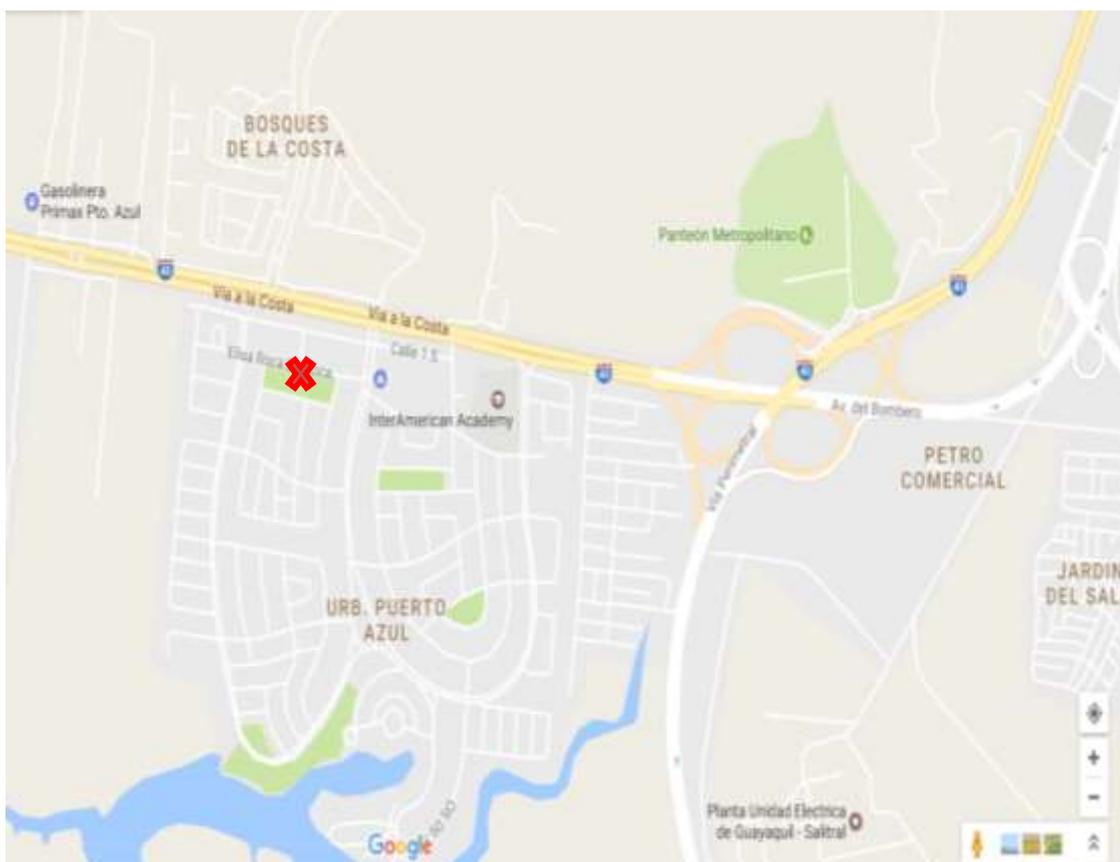


Figura 5. Sector cementeras, vía a la costa. Ubicado al noroeste de Guayaquil.

Fuente: Google Maps (2016)

- **Sector Residencial**

Sector residencia típico ubicado en la ciudadela El Paraíso, en la avenida Carlos Julio Arosemena. Este sector es característico de los sectores residenciales en la ciudad de Guayaquil, los cuales funcionan como ciudadelas cerradas que limitan el tráfico vehicular dentro de la misma, pero normalmente están localizadas cerca de avenidas con alto tráfico vehicular. En los alrededores de este sector también encontramos el Bosque Seco Protector Cerro Paraíso, centros comerciales, salones de comida y puestos comerciales. La Figura 6 muestra la localización exacta del punto de muestreo señalado con una “x” en rojo.

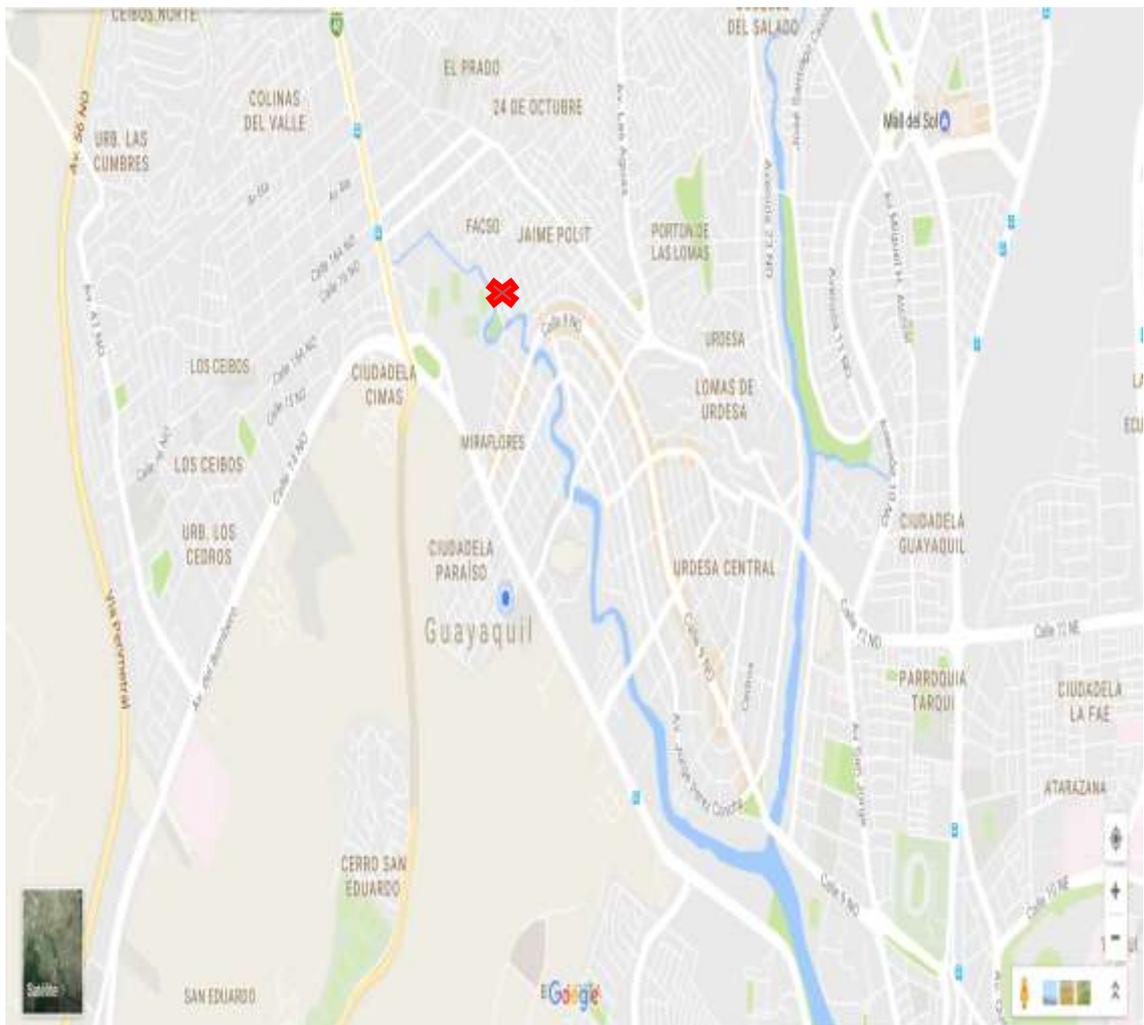


Figura 6. Sector típico residencial. Ciudadela El Paraíso

Fuente: Google Maps (2016)

#### 4.2. Meteorología

Datos meteorológicos; de temperatura, precipitación, dirección y velocidad del viento, fueron registrados en el Aeropuerto de la Ciudad de Guayaquil ubicado al noreste de la ciudad, desde 1970 a 2012, lo que representa 42 años de datos, los mismos que fueron aportados por el INAMHI.

La figura 7 muestra la precipitación promedio mensual desde el año 1970 al 2012. Observamos que la época de lluvia comienza en enero hasta abril, con máximos en febrero y marzo. La época de sequía va desde mayo a diciembre, con una acentuada época seca en agosto y septiembre, por lo que se confirma la diferencia climática que existe en el año calendario.

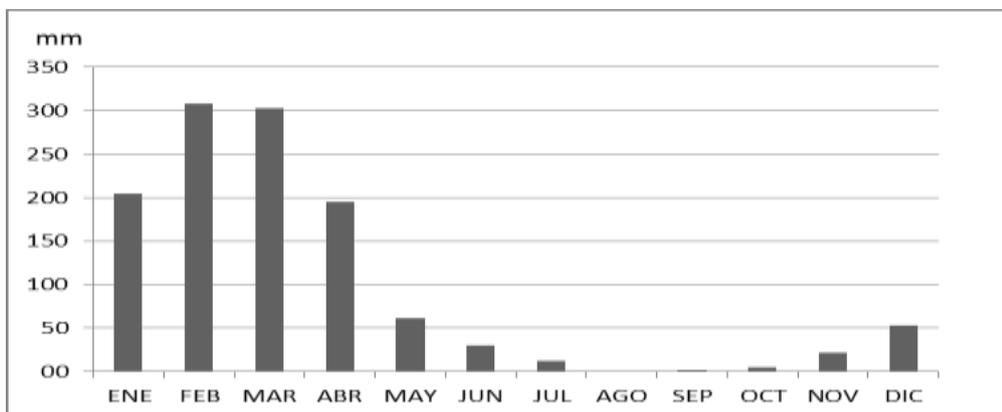


Figura 7. Registro Histórico de la precipitación mensual en Guayaquil (1970 - 2012)

Fuente: Aeropuerto de Guayaquil

En el parámetro de la temperatura tenemos un promedio de la temperatura media de  $25.4^{\circ}\text{C}$ , un promedio de la temperatura mínima de  $23.6^{\circ}\text{C}$  y de la temperatura máxima de  $27.1^{\circ}\text{C}$ . Se observa una elevación de la temperatura en el año 1982 y 1998: se puede suponer estos eventos por la presencia del fenómeno del Niño que se presentó en esos años.

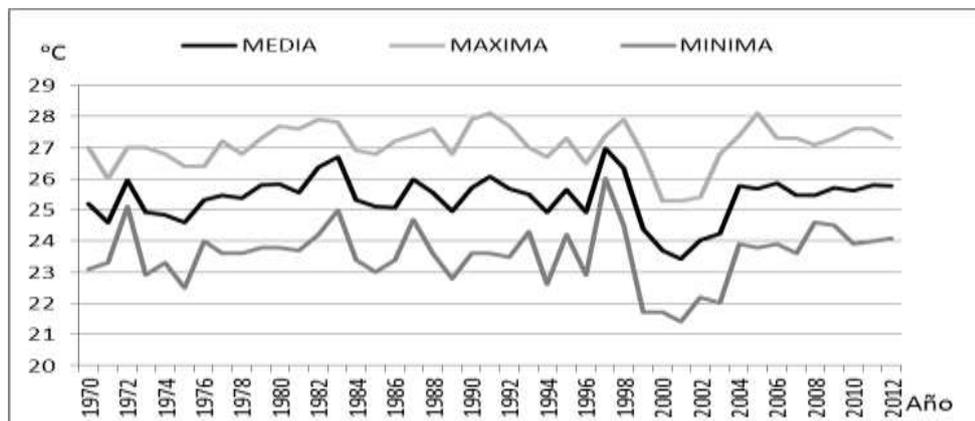


Figura 8. Registro Histórico de la temperatura anual en Guayaquil. (1970 - 2012)

Fuente: Aeropuerto de Guayaquil

### *Rosa de los vientos*

La rosa de los vientos, nos da la dirección con respecto al norte y la velocidad del viento en metros por segundo, se ha registrado en la figura # 9 la rosa de los vientos para un periodo de 1961 – 2006 con vientos provenientes del Sur - Suroeste.

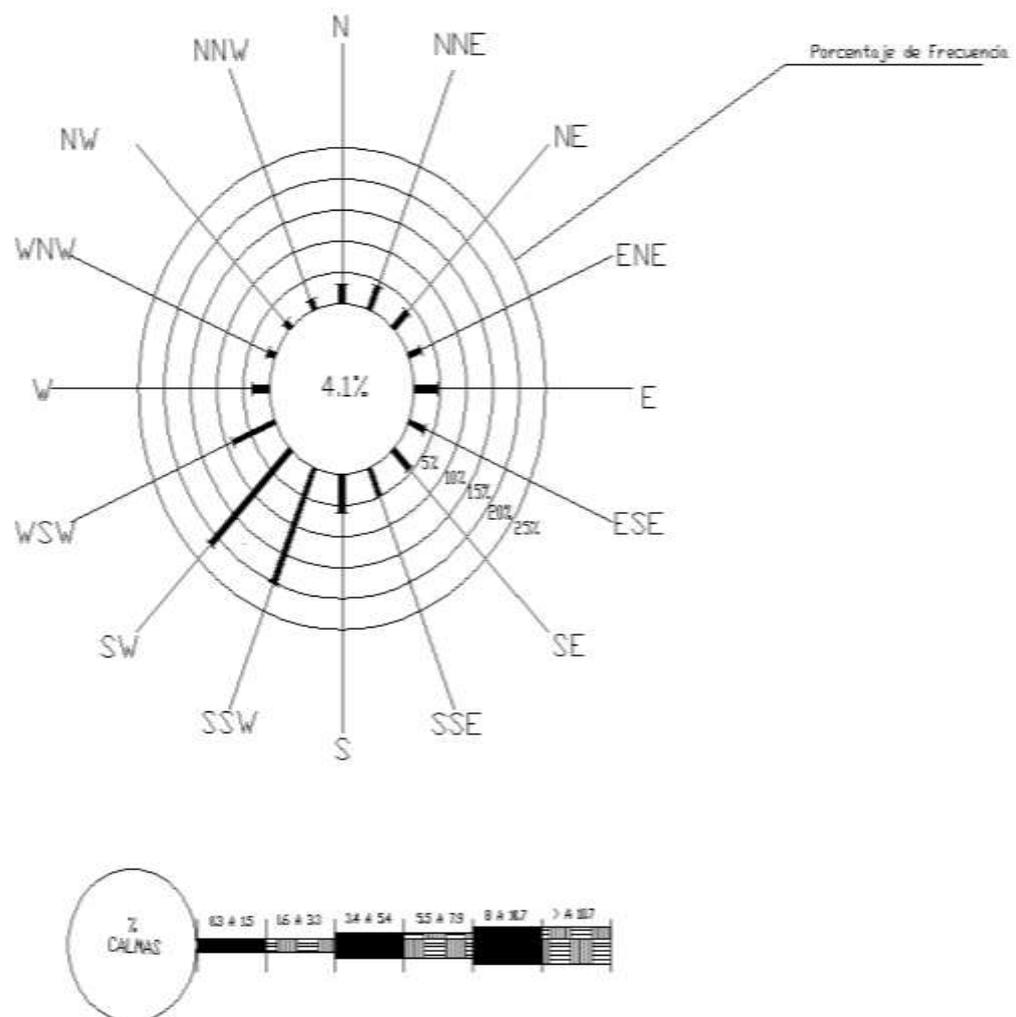


Figura 9. Registro histórico Rosa de los vientos de Guayaquil

Fuente: Aviación Civil

### 4.3. Equipos y forma de medición

- **Equipo de medición de concentración de material particulado en el aire**

La medición del material particulado se realiza usando un equipo gravimétrico en tiempo real para medir PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> o PM<sub>1</sub>, HAZ DUST EPAM 5000 (ver Figura 10), el cual es un equipo de alta sensibilidad que mide un tamaño partícula a la vez. El material particulado es detectado cada segundo por el sensor y el equipo automáticamente calcula las concentraciones de polvo en unidades de mg.m<sup>-3</sup>, las cuales se muestran en la pantalla LCD del HAZ-DUST y se almacenan en la memoria interna del equipo, para su posterior análisis. El equipo permite intercambiar sensores de acuerdo a las necesidades de la medición: PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>1</sub>. El manejo de datos el equipo permite decidir los periodos de almacenamiento de datos y varía entre 1 segundo, 10 segundos, 1 minuto y 30 minutos. La capacidad de almacenamiento de la memoria está estimada para 21.600 puntos y pueden dividirse para un máximo de 999 estaciones. El HAZ DUST EPAM 5000, tiene el software DustComm Pro 1.2, el cual se basa en Windows. Este software es a la vez una aplicación de comunicación que permite descargar datos almacenados dentro del Monitor de Partículas a un dispositivo de manipulación de datos.



Figura 10. Equipo utilizado para la recolección de datos. EPAM 5000

- **Equipo de medición de variables meteorológicas**

Para la medición de los parámetros meteorológicos se usa el anemómetro de marca Kestrel que recolecta datos de velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad, presión atmosférica, altitud, punto de rocío, presión barométrica. Este equipo viene con un software que permite conexión *bluetooth* con el programa Kestrel Communicator para la descarga de datos en formato csv, en inglés *comma-separated value*. (ver Figura 11)



Figura 11. Anemómetro KESTREL utilizado para la recolección de datos.

#### 4.4. Protocolo de muestreo

La toma de muestra se realiza para cada tamaño de partícula por separado:  $PM_{2.5}$  y  $PM_1$ , en los cuatro lugares de muestreo indicados de forma separada, por medio de monitoreo de 7 días continuos para cada tamaño de partícula, para la época de lluvia y la época seca. Se seleccionan solamente los tamaños de partículas  $PM_{2.5}$  y  $PM_1$  por ser los tamaños más pequeños y contener una mayor fracción de carbono negro. Los valores de concentración de partículas se registran cada 30 minutos durante 24 horas continuas por siete días seguidos. El protocolo a su vez contempla que en simultáneo se miden las variables meteorológicas: temperatura, dirección y velocidad del viento: la precipitación solo es recolectada durante la época de lluvia. La Tabla II muestra el protocolo de muestreo y la Tabla III presenta la planificación y cronograma de monitoreo y recolección de datos para cada estación de muestreo.

**Tabla II.** Protocolo de muestreo.

Variable	Época seca		Época lluvia	
	Tiempo de muestreo (días)	Periodo entre registro (min)	Tiempo de muestreo (días)	Periodo entre registro (min)
$PM_1$	7	30	7	30
$PM_{2.5}$	7	30	7	30
Temperatura	7	30	7	30
Dirección del viento	7	30	7	30
Velocidad del viento	7	30	7	30
Precipitación	No se mide		7	Diario

El muestreo en época seca se comienza en el Sector Industrial midiendo  $PM_1$ , para luego medir  $PM_{2.5}$  en ese mismo lugar (ver tabla III). Luego se pasan a recolectar muestras bajo el mismo protocolo en al Sector Residencial, Sector Centro y Sector Cementera. Mientras en la época de lluvia se empieza en el Sector Residencial, igualmente midiendo primero  $PM_1$  y luego  $PM_{2.5}$ , para luego medir en el Sector Cementera, Sector Centro y Sector Industrial. Semanalmente se realiza la descarga de datos de la variable evaluada ( $PM_{2.5}$  y  $PM_1$ ), realizando el intercambio de sensores de  $PM_1$  a  $PM_{2.5}$ . A su vez, el anemómetro medía simultáneamente las variables meteorológicas indicadas. En la época de lluvia, se realiza además la recolección de lluvia diaria.

**Tabla III.** Cronograma de monitoreo de material particulado.

Lugar de muestreo	Época seca				Época lluvia			
	$PM_1$		$PM_{2.5}$		$PM_1$		$PM_{2.5}$	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Sector industrial	17-oct-16	24-oct-16	24-oct-16	30-oct-16	13-feb-17	19-feb-17	20-feb-17	26-feb-17
Sector residencial	31-oct-16	07-nov-16	07-nov-16	14-nov-16	07-ene-17	13-ene-17	27-feb-17	05-mar-17
Sector centro	16-nov-16	23-nov-16	23-nov-16	30-nov-16	28-ene-17	03-feb-17	04-feb-17	10-feb-17
Sector Cementera	03-dic-16	10-dic-16	10-dic-16	17-dic-16	14-ene-17	20-ene-17	21-ene-17	27-ene-17
							07-mar-17	13-mar-17

#### 4.5. Procesamiento de datos recolectados

Una vez terminado el monitoreo del material particulado y de las variables meteorológicas se procede el procesamiento de los datos. Los datos de ambos equipos se descargan de forma independiente en formato CSV (por sus siglas en inglés comma-separated values) para luego ser procesados en Excel®, versión 2010 y posterior análisis de las tablas en el software libre Infostat (2016), WRPLOT Viwe™ (2016) y en AUTOCAD 2010.

- Patrón de comportamiento horario de concentración del material particulado

Con el objetivo de identificar posible patrón de concentración horaria del material particulado según el día de la semana, para cada sector de estudio y época de lluvia o sequía, se grafica la concentración horaria de cada tamaño del material particulado, para cada día de la semana. Este procedimiento se repite para época de lluvia y de sequía.

- Frecuencia de ocurrencia de concentración horaria por época.

Con el objeto de conocer el comportamiento de la frecuencia de valores de concentración de material particulado en los cuatro sectores de estudio y establecer la posible influencia de las precipitaciones sobre la frecuencia de concentración para

cada tamaño de partícula, se desarrollan los histogramas de concentración de  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  cada 30 minutos, para la época de lluvia y de sequía. Se usa el programa estadístico INFOSTAT (versión libre) el cual es un software para análisis estadístico de aplicación general desarrollada bajo la plataforma Windows.

- Concentración de material particulado cada 24 horas

El objetivo de este estudio es conocer la concentración de  $PM_{1-24h}$  y  $PM_{2.5-24h}$  cada día de la semana en los cuatro sectores, tanto en época de lluvia como de sequía y, verificar si se cumple con las regulaciones ambientales de la República del Ecuador (TULSMA, 2016) y los valores sugeridos por la OMS (2005). Para esto, se comparan los valores de concentración de  $PM_{2.5-24h}$  de cada sector con las normas mencionadas: se aclara que hasta la fecha las  $PM_1$  no son reguladas por ningún gobierno u organismo internacional. Para el caso de las  $PM_1$ , los valores de concentración diario se comparan entre si y frente las concentraciones de  $PM_{2.5}$ . Como apoyo se analizan las rosas de viento semanal para establecer evidencias de influencia de la dirección y velocidad del viento sobre la concentración.

Para la generación de las rosas de los vientos, se procesan los datos de dirección y velocidad del viento en Excel y seguido se utiliza el programa de versión libre WRPLOT ViewTM, el cual es un programa de Windows que genera estadísticas y diagramas de la rosa del viento para varios formatos de datos meteorológicos. La rosa de viento representa la frecuencia de ocurrencia de vientos en cada uno de los sectores de dirección de viento especificados y clases de velocidad del viento para un lugar y un período de tiempo determinados (Lakes Environmental, 2016).

- Influencia de la dirección del viento sobre la concentración del PM

Para analizar la dirección hacia la cual se movería el contaminante si estuviera únicamente gobernado por la dirección del viento, se realiza para cada semana de monitoreo tanto en la época seca como de lluvia, lo que denominaremos “Rosas de PM”. Como se dijo anteriormente, el muestreo se realiza midiendo en simultáneo concentración de PM y variables meteorológicas: cada equipo registra cada dato asociado a un instante de tiempo que queda registrado. Se ordenan los datos de dirección del viento con su respectivo valor de concentración material particulado, asociando ambas variables por medio el momento de recolección. Se calcula la frecuencia de la concentración para los siguientes rangos de dirección del viento: 0 - 90°, 90 - 180°, 180 - 270°, 270 - 360°. Estos resultados se grafican por medio de rosas de concentración PM haciendo uso del programa de dibujo AUTOCAD, que permite representar la dirección del viento y el material particulado para cada tamaño de partícula, cada sector de estudio y para la época de lluvia y sequía.

- Correlación entre variables

Para conocer la posible relación entre los dos tamaños de partículas y las variables meteorológicas: temperatura y velocidad del viento, para época de lluvia y de sequía, se usa el índice de correlación simple de Pearson y un modelo de regresión lineal, haciendo uso del programa estadístico Infostat, versión libre. Adicionalmente, aun

cuando, los dos tamaños de partícula fueron recolectados en dos semanas subsiguientes se analizó la posible correlación entre estas variables.

Se ingresan las variables de material particulado ( $PM_1$  y  $PM_{2.5}$ ) y las variables meteorológicas (temperatura, dirección del viento y velocidad del viento) para determinar la correlación ( $r^2$  y coeficiente de Pearson), lo cual permite obtener la relación entre estas variables para determinar el nivel de incidencia o fuerza en la variabilidad de la variable independiente y su efecto en la variable dependiente.

## 5. RESULTADOS

- **Patrón de comportamiento horario de concentración del material particulado**

En las Figuras 12 y Figura 14 se presentan para los cuatro sectores de estudio (gráficas a, b, c y d) el comportamiento horario de la concentración de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  para la época seca. Las Figura 13 y Figura 15 son equivalentes a las anteriores pero, para la época de lluvia.

En la época seca y de lluvia se puede determinar que en general las concentraciones en el sector industrial son las más altas con respecto a los demás sectores. Los valores de las concentraciones de material particulado en la época de lluvia tienden a ser menor que en la época seca: el sector industrial en la época de lluvia sigue siendo el más contaminado. Se observa en general un rango de mayor concentración que se repite en el mismo horario (rango de horas pico) los siete días de la semana: el rango de horas pico está homogenizado para la época seca en casi todos los sectores: este rango horario cambia entre  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Se observa que las precipitaciones en los sectores industriales y cementeras no modifican la presencia de horas pico de mayor concentración de contaminantes y muestran valores altos dispersos ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ), mientras en el sector centro y residencial la concentración de estos dos tamaños de partícula se observan homogéneas en todo el rango horario durante la época de lluvia. Durante el horario diurno se observa una mayor concentración de los contaminantes: en todos los sectores muestreados se registran concentraciones más altas en horas del día que en la noche. En el sector industrial y sector cementeras el nivel de  $PM_{2.5}$  se mantiene elevado en la época seca y de lluvia, esto se puede suponer debido a la demanda de diésel y bunker a nivel industrial y la presencia de vehículos pesados que circulan alrededor de estos dos sectores.

### **$PM_{10}$**

#### *Época seca*

En el sector industrial se observa que las concentraciones de material particulado empiezan a incrementarse desde tempranas horas de la mañana, 06h30, con un rango de horas pico desde las 12h00 hasta las 18h00. Esta situación podría ser resultado de la quema de bunker y diésel en las industrias y el tráfico vehicular, que empiezan a laborar desde las 07h00. El pico máximo de concentración de material particulado fue de  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 15h00, en el horario de la noche la concentración se mantiene cerca de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En el sector residencial no se observa un rango horario de mayor concentración que se mantiene en los días de la semana, pero hay unas anomalías los días lunes y martes con concentraciones que sobresalen de la media del lugar entre las 14h00 y 18h30, con un valor máximo de concentración de  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En términos generales los datos de concentración son homogéneos en el día y la noche.

En el sector centro se observa que el rango de picos máximos de concentración se encuentra entre 14h00 y 18h00, con un máximo de  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 17h00. En horarios de la noche las concentraciones no presentan variaciones importantes.

Para el sector cementeras se observa picos de concentración leves en el horario diurno 14h00 - 18h00, mostrando un máximo de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 16h00. En el horario nocturno la concentración no presenta variaciones.

#### *Época de lluvia*

Para el sector industrial se observa las concentraciones de material particulado cambian con respecto a la época seca. La concentración se incrementa en horas de la tarde, 15h30 - 20h30, con un máximo de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para las 16h00. En el sector residencial no se observa ningún rango de picos en el horario diurno, aunque esa semana no se presentaron precipitaciones. En el sector centro se observa una situación atípica los días lunes y martes, con un pico de concentración a las 17h00 que llegó a  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la noche hasta la madrugada se observan picos de concentración elevados entre 21h30 y 03h00: estos picos horarios no se vieron disminuidos por la precipitación. En el sector cementeras no se observan variaciones.

#### **PM<sub>2.5</sub>**

##### *Época seca*

En el sector industrial el comportamiento de la concentración es parecido al de PM<sub>1</sub>, pero el rango de horas picos empieza más tarde 10h00. El máximo de concentración es de  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el horario de las 13h30. Se debe tomar en cuenta que existe mayor actividad industrial y vehicular en horas del día que en la noche. En el sector residencial vuelven a ocurrir los altos valores de concentración anómalos acontecidos con la PM<sub>1</sub> los días lunes y martes: se resalta que las mediciones para los dos tamaños de partícula se hicieron con una semana de diferencia. En el sector centro se observa un cambio en el horario de los picos de máxima concentración de material particulado en relación a PM<sub>1</sub>. El rango de picos ocurre entre las 14h00 y 20h00, con un máximo de  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la hora de las 17h30. Se puede suponer que esta tendencia se debe al alto tráfico vehicular. Las concentraciones presentan menos variaciones a partir de las 20h00 hasta horas de la madrugada. Para el sector cementeras se presenta el lunes una situación atípica con concentraciones de hasta  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  entre las 11h30 y 17h00. El resto de los días de la semana la concentración del contaminante fue menor.

##### *Época de lluvia*

En el sector industrial se observa una gran dispersión de los datos de concentración de material particulado entre las 06:30 y 19h00, con un pico de  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En esta semana de muestreo se registraron precipitaciones, sin embargo se presentó gran dispersión de las concentraciones. En el sector residencial se observa una homogenización de los datos todo el día: en esta semana se registraron lluvias. En el sector centro se observa una disminución notable de la concentración de PM<sub>2.5</sub> producto de las lluvias. Prácticamente no se observan picos horarios, salvo el viernes y domingo en horario tarde- noche. Para el sector cementeras se presenta una gran dispersión de la concentración para el horario diurno, mostrando un pico entre 09h00 y 18h00, con un máximo de concentración de  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En el horario nocturno los niveles de concentración se homogenizan y bajan con respecto a los del día.

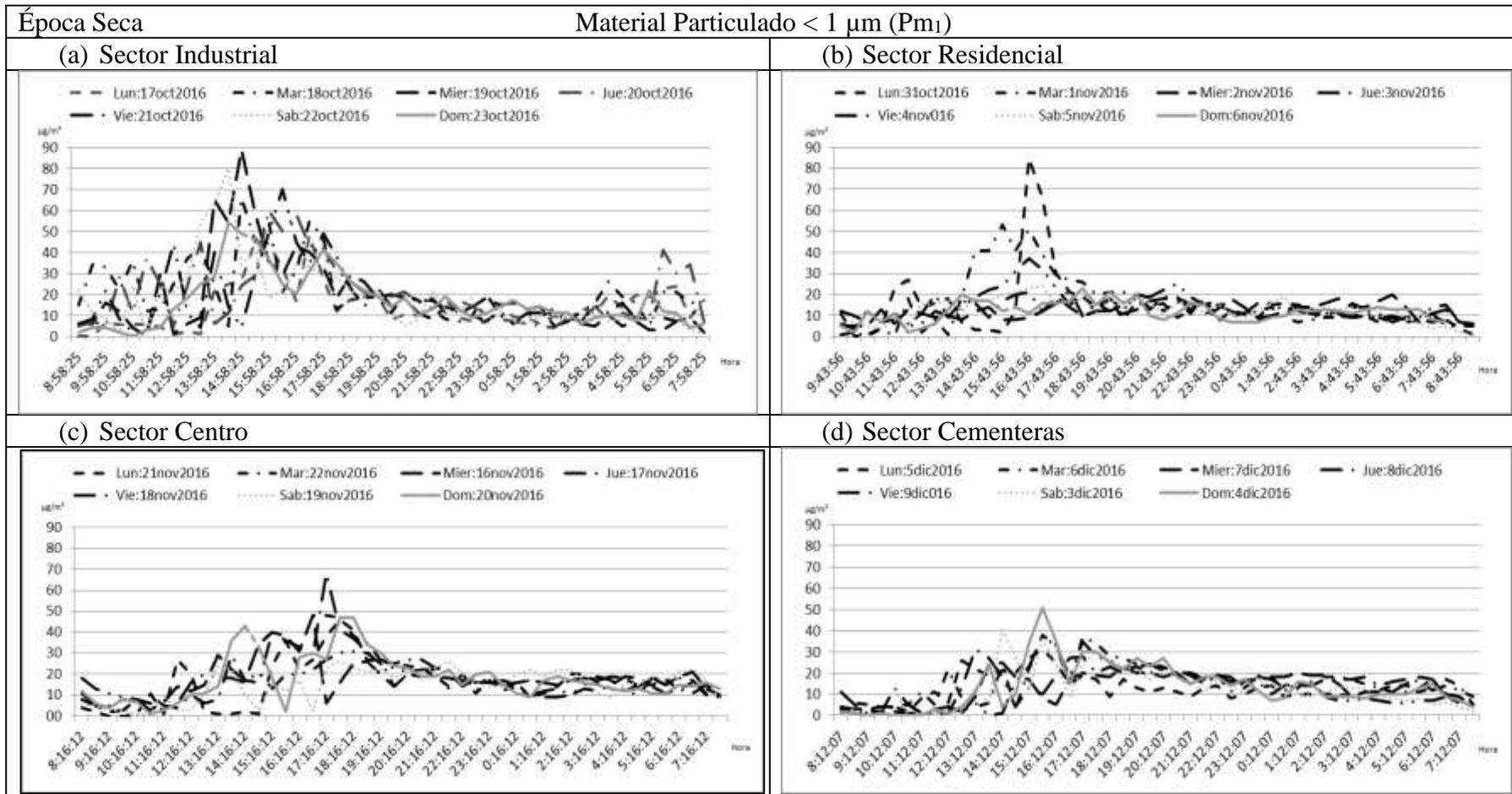
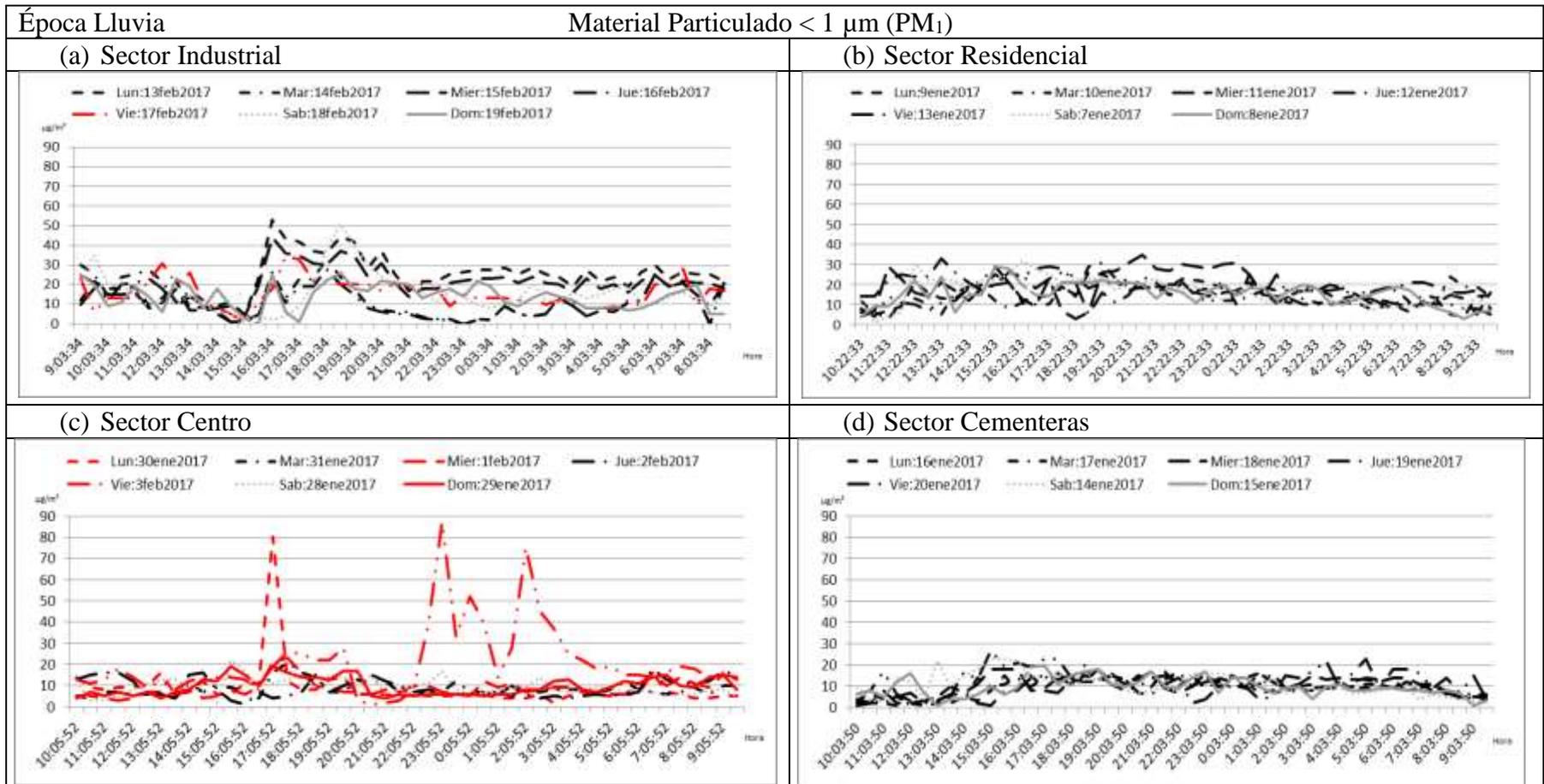


Figura 12. Comportamiento diario  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  por sector/época



**Figura 13.** Comportamiento diario  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  por sector/época

Nota: se señalan en rojo los días que se registró precipitación

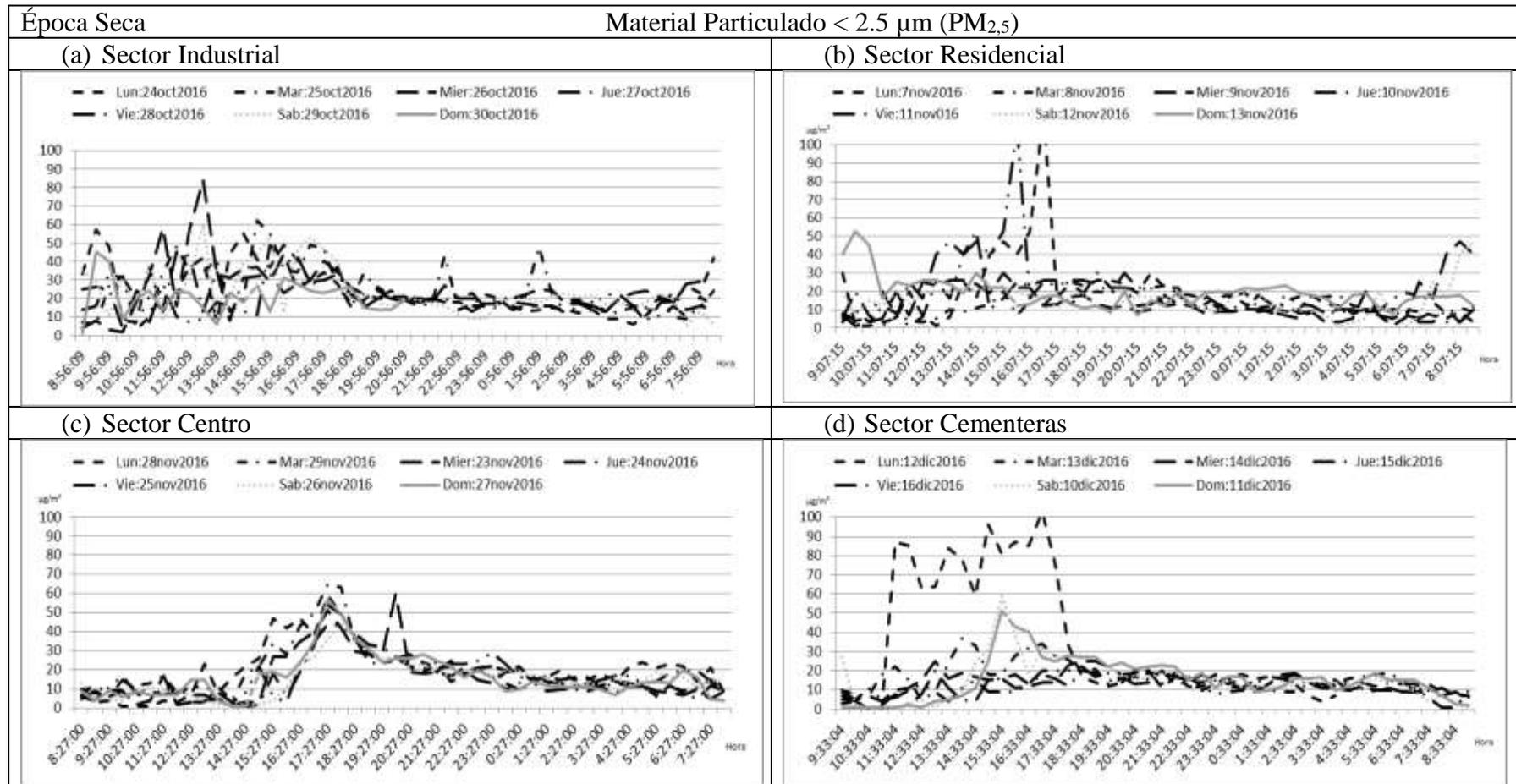
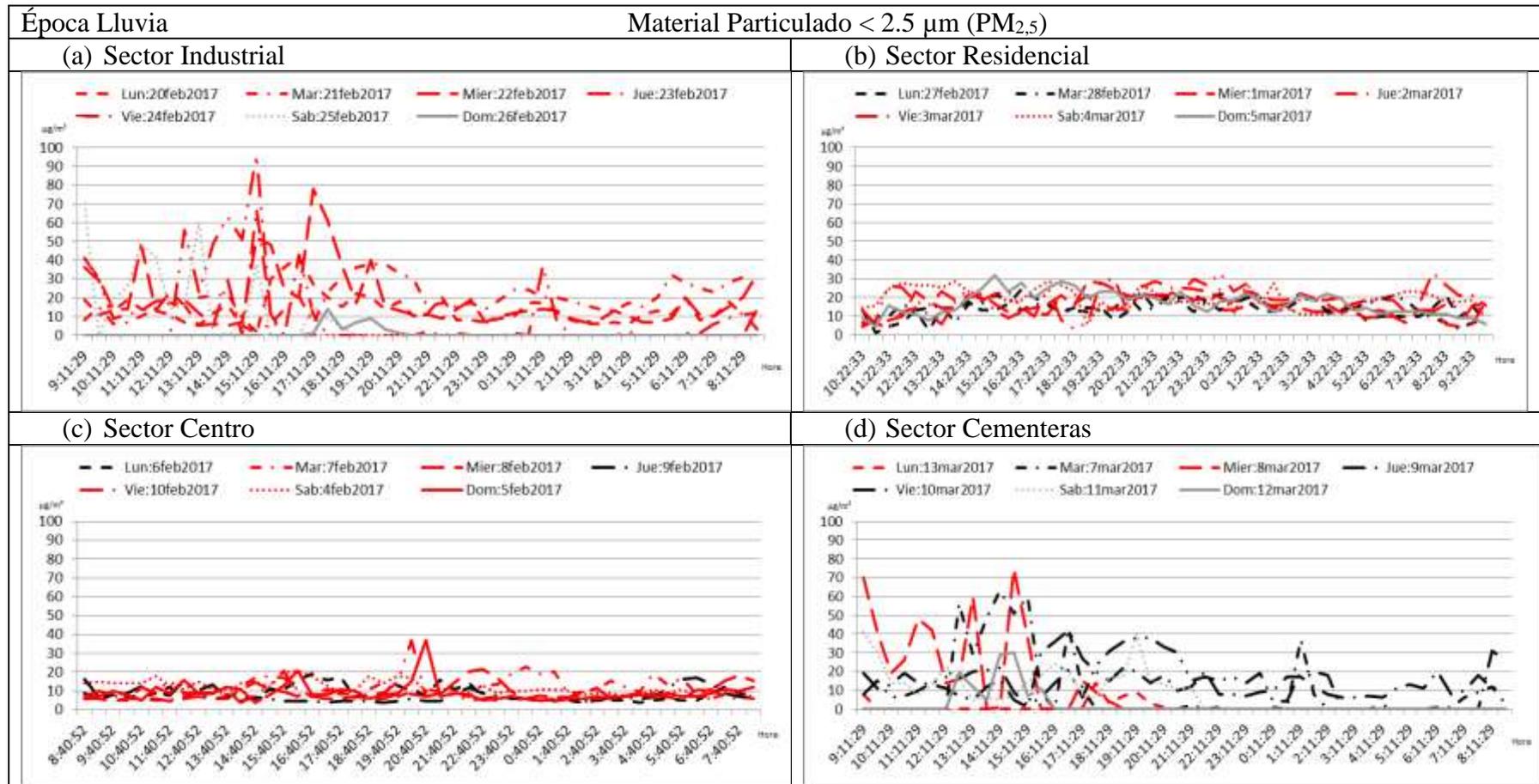


Figura 14 Comportamiento diario  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  por sector/época



**Figura 15.** Comportamiento diario  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  por sector/época

Nota: se señalan en rojo los días que se registro precipitación.

- **Frecuencia de ocurrencia de concentración horaria por época.**

En los histogramas se puede observar la frecuencia de repetición de concentraciones horarias de material particulado muestreadas ( $PM_1$  y  $PM_{2.5}$ ) durante la época seca y la época de lluvia para los cuatros sectores.

Para la época seca se obtuvo que la concentración de  $PM_1$  más frecuente es la de  $13.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , con un porcentaje de frecuencia de 40%. Seguidamente está la concentración de  $4.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con un porcentaje de frecuencia de 25%, luego con un 20% está la concentración de  $22.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y con un 15% de frecuencia concentraciones de 31.15, 40.05, 57.85 y  $66.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para  $PM_{2.5}$  la concentración de material particulado de  $38.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se repite con un porcentaje de frecuencia de 98%.

Para la época de lluvia las concentraciones de  $PM_1$  más frecuente es prácticamente la misma que para la época seca. No se observa diferencia entre el comportamiento de la frecuencia de concentración horaria de las  $PM_1$  en época de lluvia y época seca.

Mientras que para  $PM_{2.5}$  la presencia de lluvia modifica la concentración horaria y su frecuencia de ocurrencia. En lluvia la frecuencia mayor de ocurrencia (50%) es para una concentración de  $4.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  frente a una ocurrencia del 98% con una concentración de  $38.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en época seca

- **Concentración de material particulado cada 24 horas**

Se resalta que las  $PM_1$  no son reguladas. En la figura 17 (a y b) y 18 (a y b) se han graficado las concentraciones de  $PM_1$ -24 horas y  $PM_{2.5}$ -24 horas en todos los sectores muestreados por época (seca y lluvia).

Se puede observar que para  $PM_1$  los niveles más altos de concentración ocurren en el sector industrial. Este comportamiento se mantiene en lluvia y sequía, con niveles de concentración de hasta  $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en época seca y  $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en época de lluvia. En época seca las concentraciones más altas del sector industrial son semejantes a las del sector centro,  $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El sector cementeras y el sector residencial presentan menor nivel de concentración para este tamaño de partícula, entre  $15 - 11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En general, se observa una menor concentración de  $PM_1$  en la época de lluvia con valores menores a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en los sectores residencial y cementeras. En el sector centro no se observa disminución de la concentración de  $PM_1$  por la lluvia, posiblemente por las emisiones continuas de este tamaño de partícula desde los vehículos a diésel que recorren de forma perenne este sector de la ciudad. El sector industrial no muestra un comportamiento que se repita a través de los días de la semana.

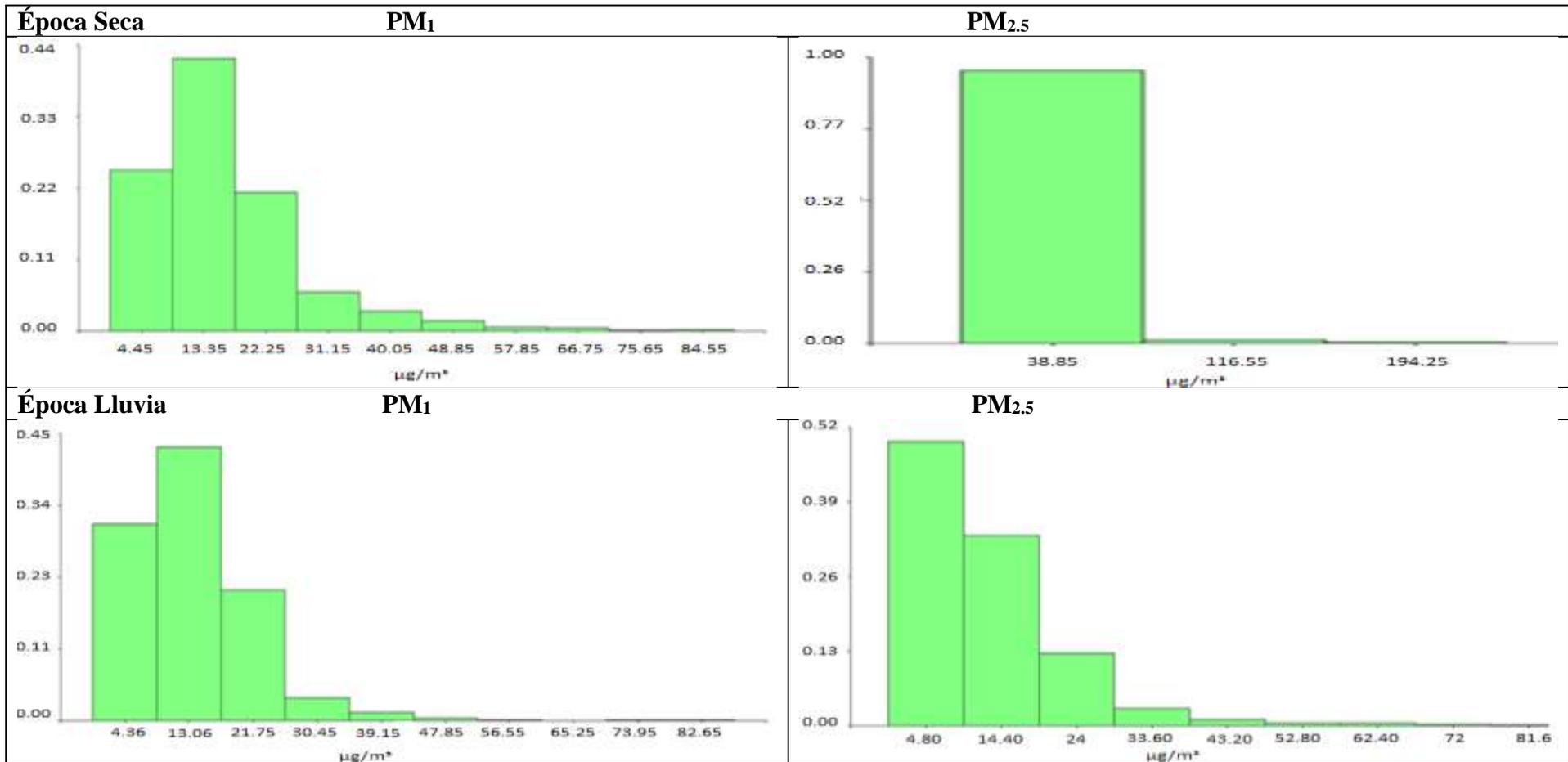


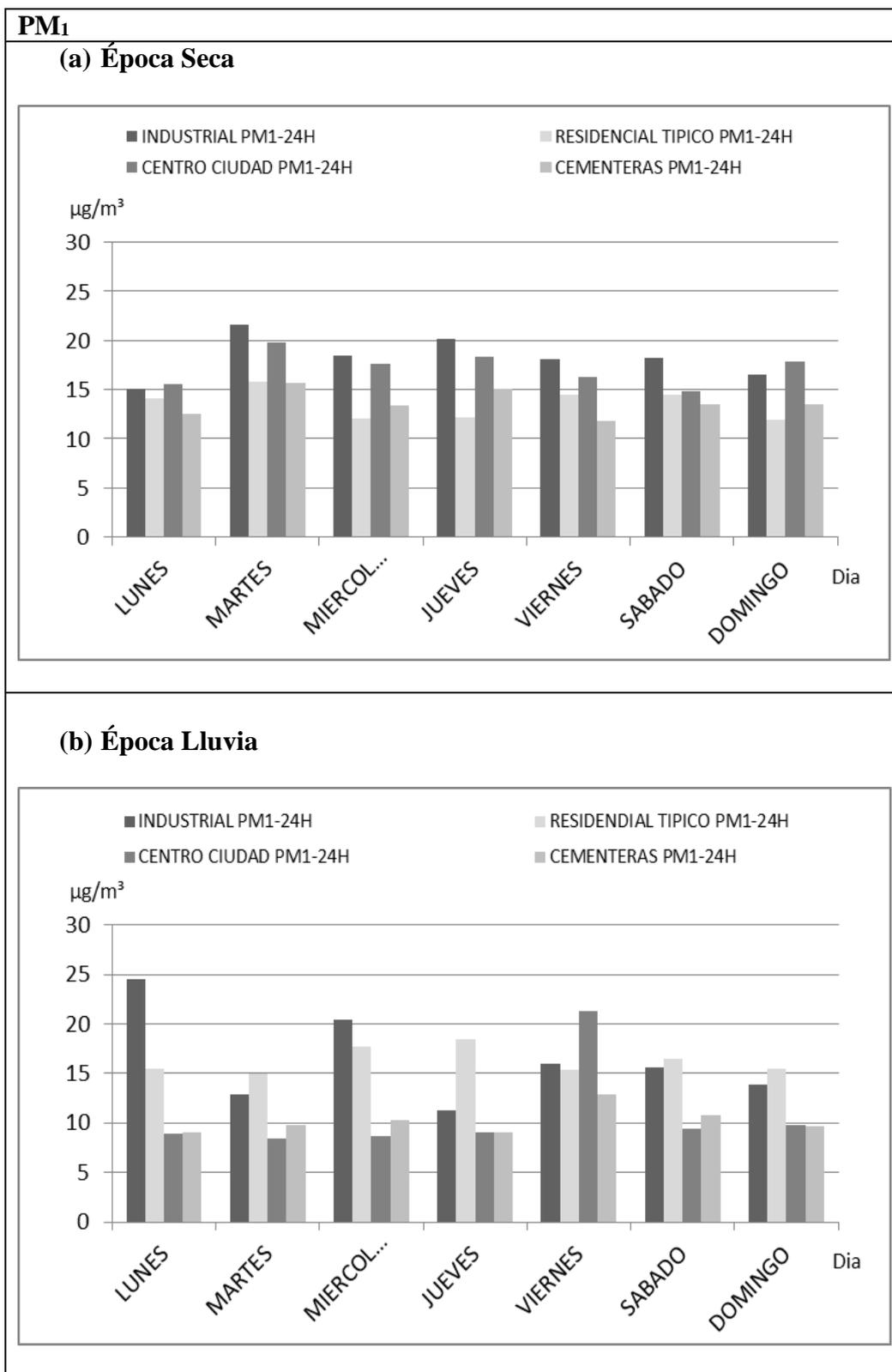
Figura 16. Distribución espacial de los datos totales por PM/Época

Para el contaminante  $PM_{2.5}$ , se colocan los valores permisibles establecidos por la República del Ecuador (2016) y la OMS (2005). Se observa que se cumple con ambas normativas. En la época seca, las concentraciones más altas están en el sector industrial, salvo el día lunes cuando en el sector cementeras alcanzó un valor atípico ( $PM_{2.5-24h} = 75 \mu g/m^3$ ) posiblemente a evento ocurrido en cementeras y/o canteras del sector.

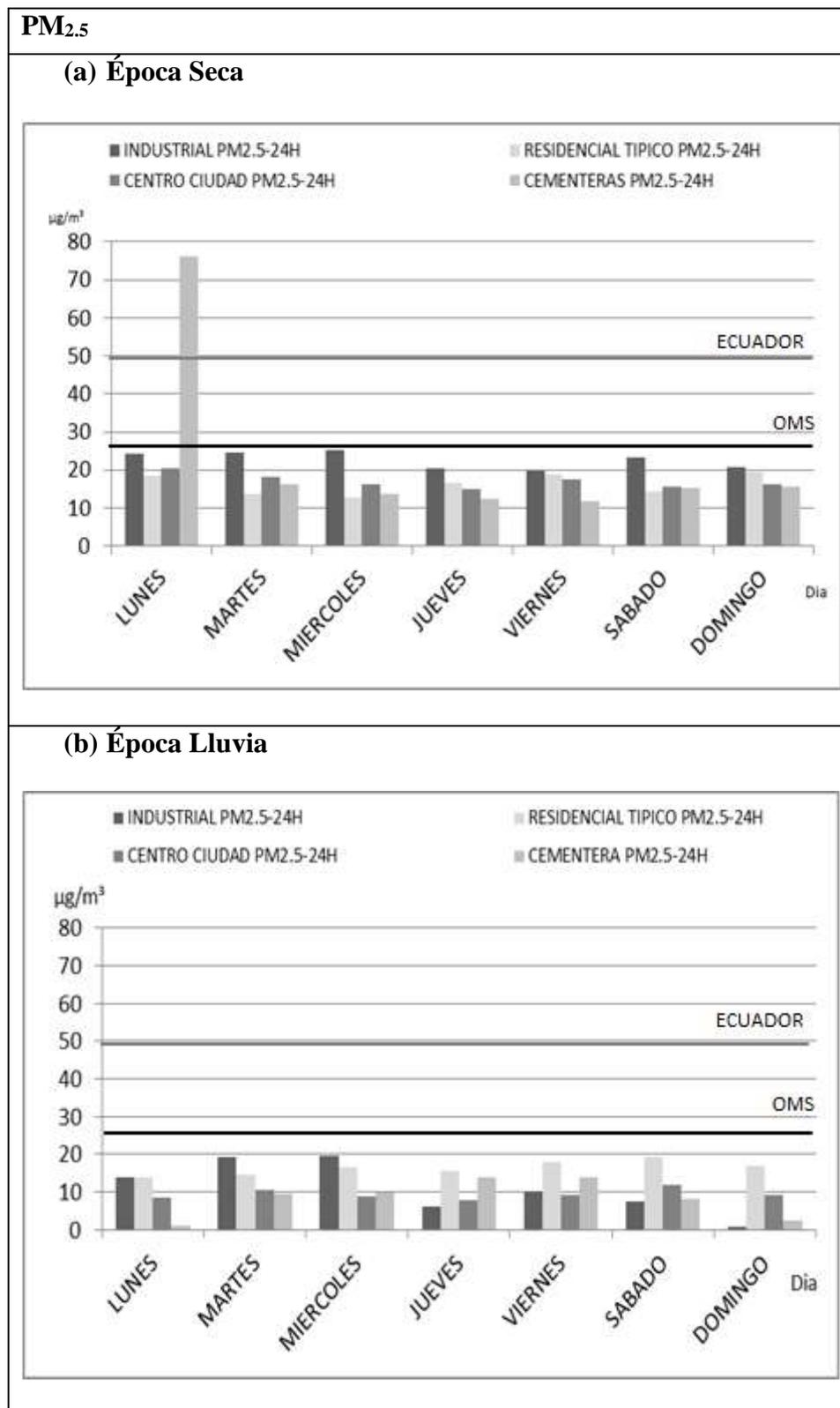
En la época de lluvia, la concentración de  $PM_{2.5-24h}$  es notablemente más baja que en la época seca, con valores por debajo de los  $10 \mu g/m^3$ . Se observa una influencia de la lluvia sobre la concentración de este tamaño de partícula. Para la época seca el sector más contaminado es el industrial seguido por el centro, este patrón no se repite con lluvia.

En la figura 19 se han colocado las rosas de los vientos semanales por sector de muestreo y por época (seca y lluvia). El viento predominante en la época seca es de Sureste con una velocidad predominante de 1 a 4 m/s. los vientos locales del sector industrial presentan un comportamiento distinto en el que predominan vientos del Suroeste, con la misma velocidad.

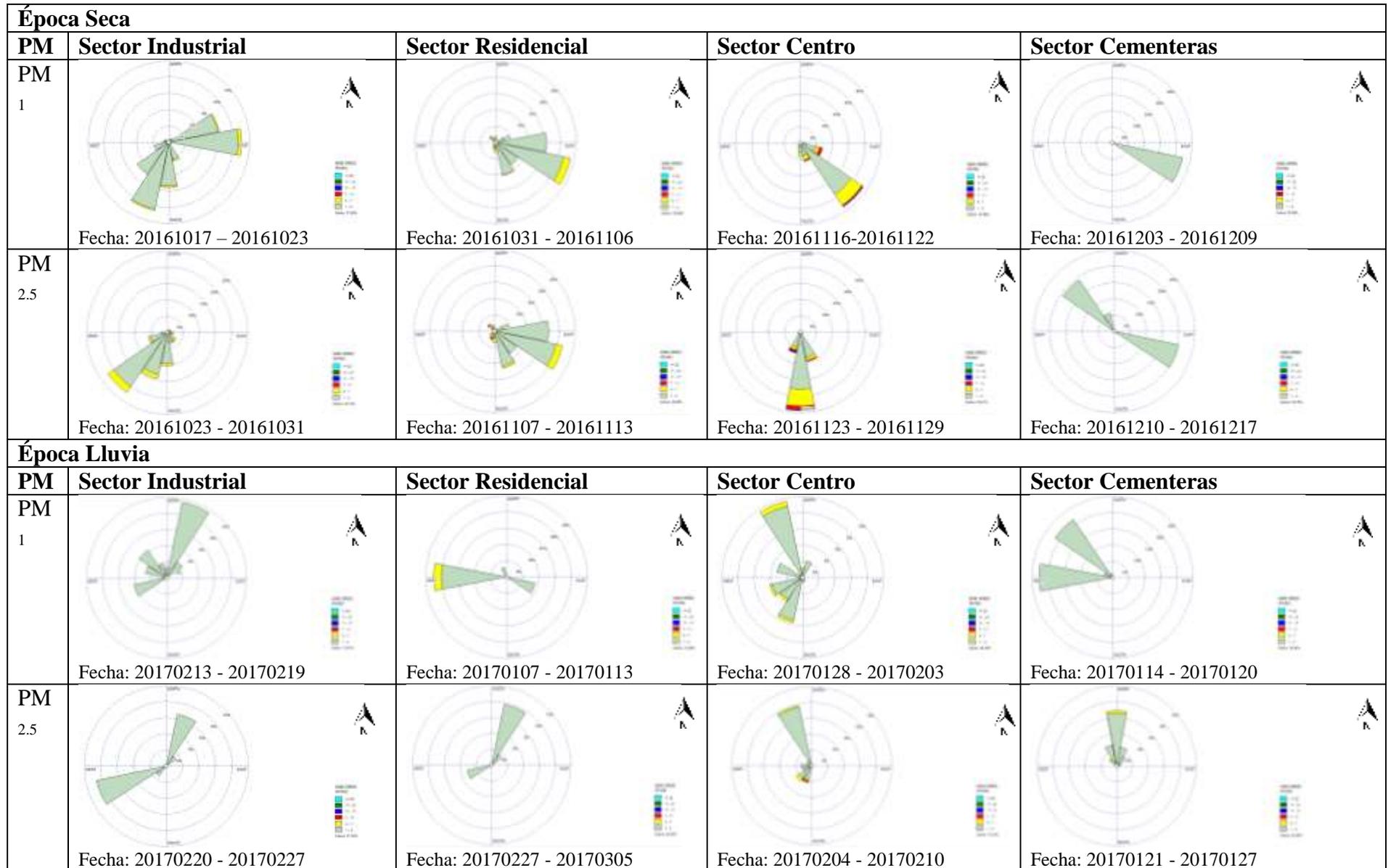
Para la época de lluvia la dirección del viento predominante cambia, mostrando vientos prevalentes del Norte que varían según el sector entre el Noroeste y el Noreste. En el sector industrial se siguen observando vientos del Sureste. La velocidad prevalente es la misma que en la época seca.



**Figura 17.** Concentración 24 horas combinadas para sector de PM<sub>1</sub> en la época de lluvia y sequía.



**Figura 18.** Concentración 24 horas combinadas para sector de PM<sub>1</sub> en la época de lluvia y sequía.



**Figura 19.** Rosa de los vientos por época y sector de monitoreo.

- **Influencia de la dirección del viento sobre la concentración del PM**

Con las figuras 20 (a,b,c,d), 21 (a,b,c,d), 22 (a,b,c,d), y 23 (a,b,c,d) se quiere conocer la dirección en la que se trasladaría el material particulado si estuviera solo influenciado por la dirección del viento. Se grafica las concentración diarias de  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  relacionadas con la dirección del viento para cada sector y así conocer hacia qué dirección se dispersaría el contaminante bajo esta hipótesis.

#### *Época seca*

Para la época seca se puede observar (figura 19) que los vientos que predominan son bastantes homogéneos en sus direcciones. En los sectores centro, cementera y residencial el 85% de  $PM_1$  iría dirigido al Noroeste de la ciudad, mientras que en el sector industrial el 48% de  $PM_1$  iría hacia el Noreste de la ciudad. Para  $PM_{2.5}$  en el sector industrial el 76% de  $PM_{2.5}$  se dirigiría hacia el Noreste de la ciudad y el 16% hacia el Noroeste; en el sector residencial el 79% se dirigiría hacia el Noroeste de la ciudad, el 10% hacia el Suroeste, el 6% hacia el sureste y el 5% hacia el Noreste; para el sector centro el 54% se dirigiría hacia el Noroeste y el 46% hacia el Noreste de la ciudad; y para el sector de las cementeras el 51% se iría hacia el Noroeste y el 49% hacia el Sureste.

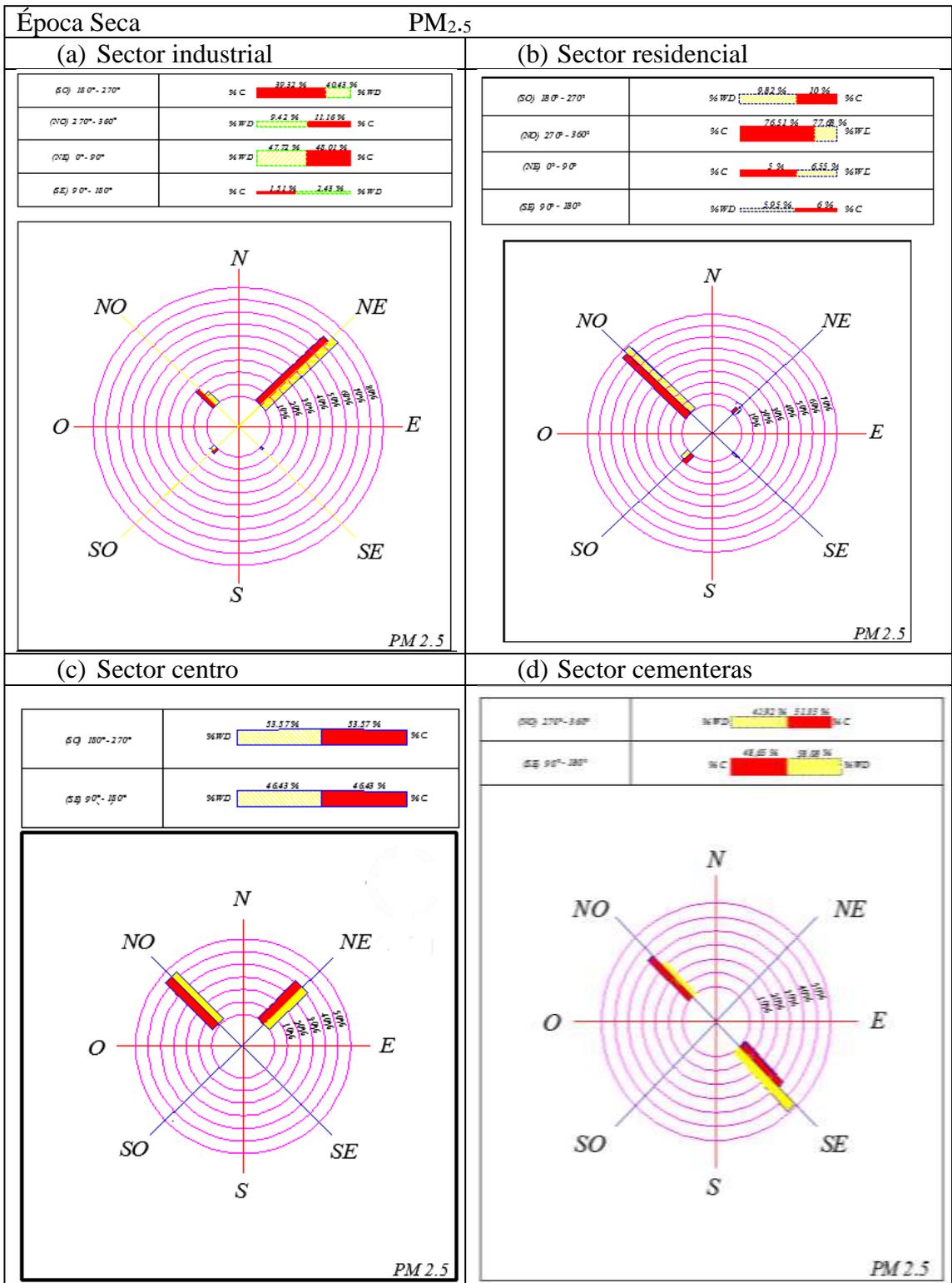
#### *Época de lluvia*

Para la época de lluvia, las direcciones varían. Para  $PM_1$  en el sector industrial el 44% se iría al Suroeste, el 23% al Noreste y el 33% hacia el sureste de la ciudad; en el sector residencial el 67% hacia el Sureste, el 32% hacia el Noroeste y el 1% hacia el Suroeste; Para el sector centro 37% se dirigiría hacia el Suroeste, el 44% hacia el Noreste, el 18% hacia el Sureste y el 1% al Noroeste. Para el sector cementeras el 92% se iría hacia el Sureste, el 7% hacia el Noreste y el 1% al Suroeste.

Para la época de lluvia el comportamiento de  $PM_{2.5}$  se direccionaría en su mayoría hacia el Sureste y el Noreste de la siguiente manera. En el sector industrial, el 50% de  $PM_{2.5}$  hacia el Suroeste, el 45% de  $PM_{2.5}$  hacia el Noreste, el 4% de  $PM_{2.5}$  hacia el Noroeste y el 1% de  $PM_{2.5}$  hacia el Sureste. En el sector residencial típico el 68% de  $PM_{2.5}$  se dirigiría hacia el Suroeste, el 30% de  $PM_{2.5}$  hacia el Noreste, el 1% de  $PM_{2.5}$  hacia el Noroeste y el 1% de  $PM_{2.5}$  hacia el Sureste. Para el sector centro ciudad el 66% de  $PM_{2.5}$  se dirigiría hacia el Sureste de la ciudad, el 33% de  $PM_{2.5}$  hacia el Noreste y el 1% de  $PM_{2.5}$  hacia el Suroeste. En el sector de las cementeras, se dirigiría el 99% de  $PM_{2.5}$  hacia el Suroeste y el 1% de  $PM_{2.5}$  hacia el Sureste.

Bajo esta hipótesis del contaminante  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  relacionada con la dirección del viento se puede inferir que en la época seca para los sectores; cementeras, residencial y centro, el contaminante tendría una tendencia de dispersión hacia el Noroeste y Noreste afectando la parroquia Tarqui, donde en su mayoría se encuentran cooperativas de viviendas, ciudadelas y barrios urbanos. Para la época de lluvia existe una mayor variabilidad en las direcciones hacia donde iría el contaminante  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  pero existe una mayor frecuencia hacia las direcciones del Suroeste y Sureste de la ciudad donde se vería mayor afectación en las parroquias Febres Cordero y Parroquia Letamendi, en estas zonas en su mayoría se encuentran asentadas una población de escasos recursos.





**FIGURA 21.** Concentraciones de PM<sub>2.5</sub> relacionados con la dirección del viento por época

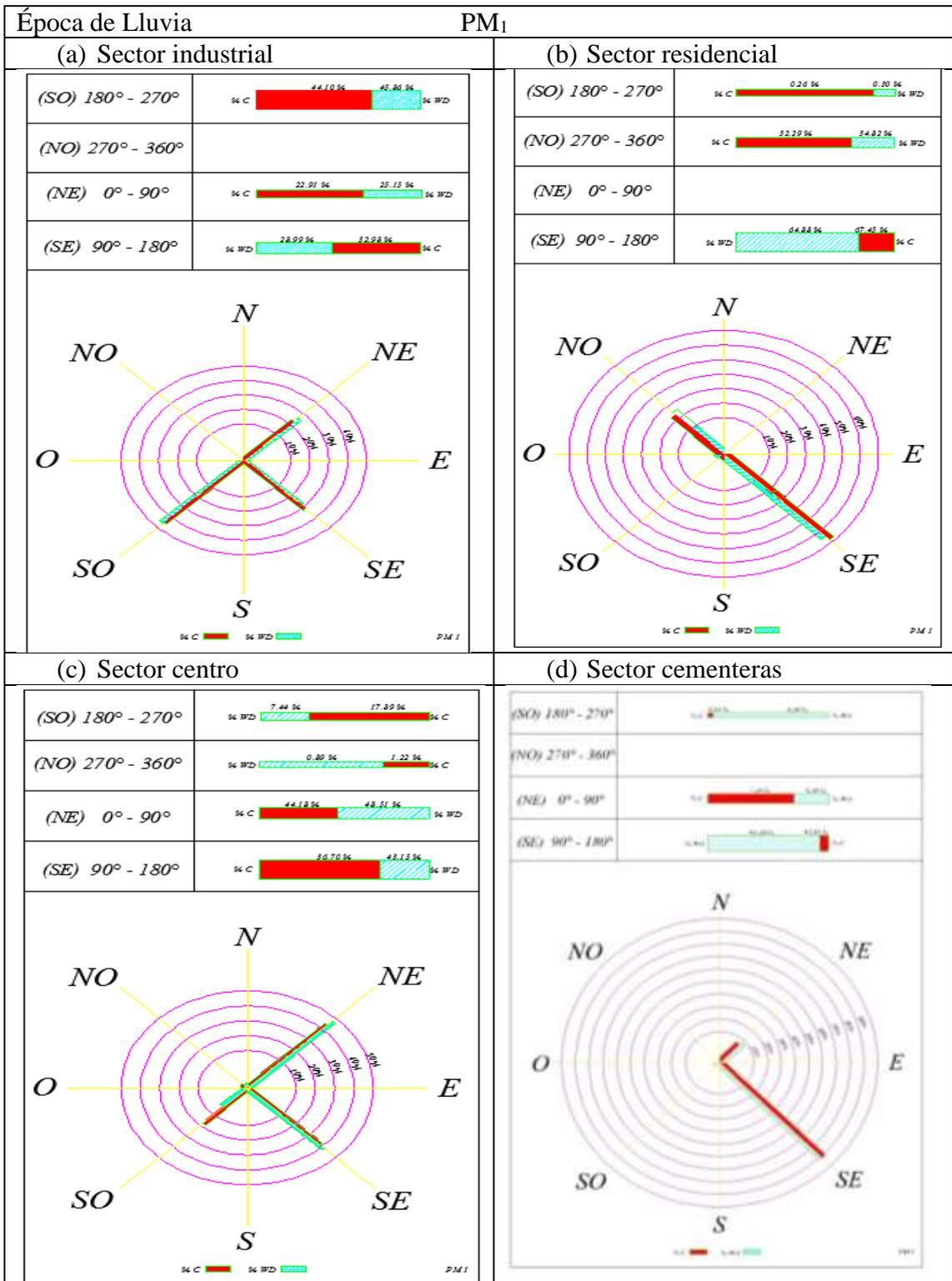
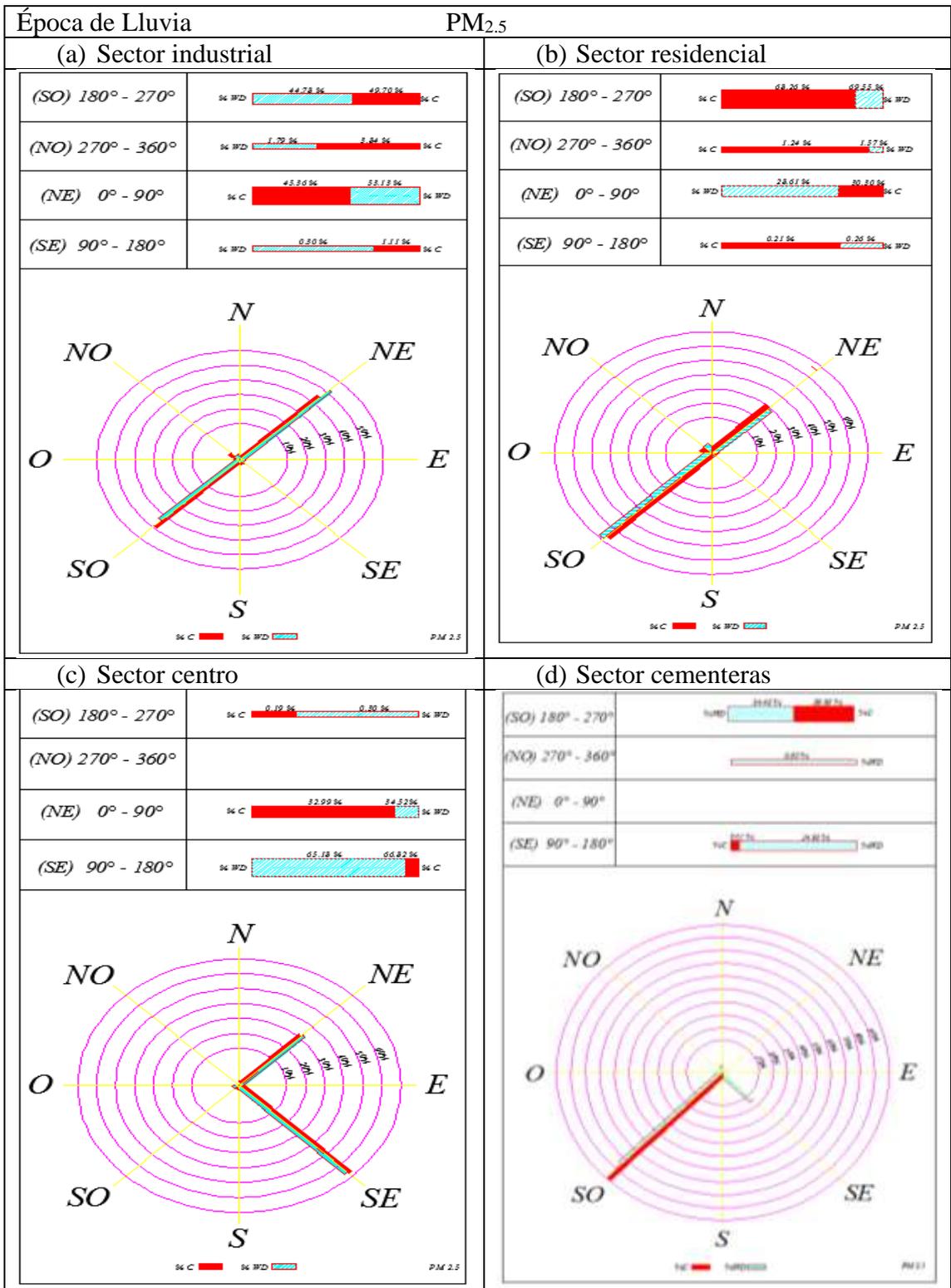


FIGURA 22. Concentraciones de PM<sub>1</sub> relacionados con la dirección del viento por época



**FIGURA 23.** Concentraciones de PM<sub>1</sub> relacionados con la dirección del viento por época

### Correlación entre variables

Para determinar la correlación entre la concentración de los dos tamaños de partícula ( $PM_1$  y  $PM_{2.5}$ ) y algunas variables meteorológicas: velocidad del viento y temperatura en época seca y de lluvia, se utiliza el coeficiente de correlación simple de Pearson ( $r$ ) y coeficiente de determinación " $r^2$ " considerando los promedios diarios de  $PM_1$ -24h y  $PM_{2.5}$ -24h por época.

Del monitoreo realizado para la época seca se tomaron en conjuntos los datos de las concentraciones en 24 horas de los cuatro sectores durante las dos semanas un monitoreo (ver tabla IV). Se repitió lo mismo para la época de lluvia (tabla V). Se destaca que aun cuando los dos tamaños de partícula no se recolectaron en la misma fecha, sino con una semana de diferencia, el hecho que las fuentes de emisión son las mismas, la topografía y usos del suelo no cambió entre esas semanas y la meteorología del lugar no presentó diferencias importantes entre una y otra medición de concentración, ese desfase no implique desviaciones importantes del comportamiento esperado.

Al evaluar las variables  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  se obtiene una correlación lineal simple de Pearson del 55% para la época seca, lo que evidencia una correlación moderada entre ellas con un "coeficiente de determinación  $r^2$ " del 30% para un modelo lineal, y una prueba estadística t-Student significativa, y para la variable  $PM_1$  un indicador de probabilidad menor a  $\alpha=0,05$  para el 5% de error estadístico y se lo puede visualizar en la figura 24. El modelo lineal usado está representado por medio de la ecuación 1.

$$Y=B_0+B_1*x_1 \quad (\text{ec.1})$$

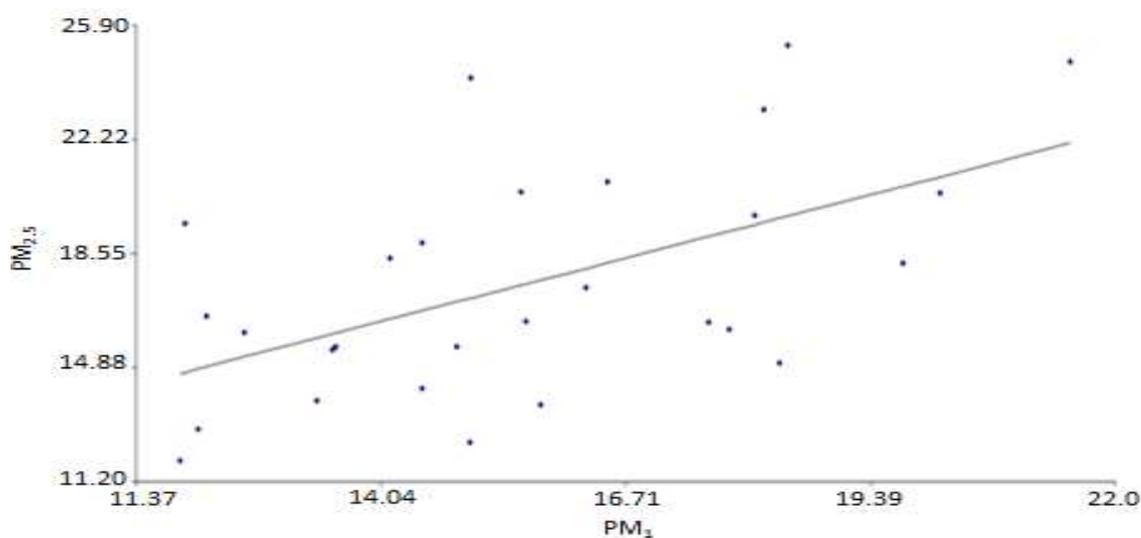
Donde:

$B_0, B_1$	Coefficientes de proyección del modelo
$Y$	Variable dependiente = $PM_{2.5}$
$X_1$	Variable Independiente = $PM_1$

La ecuación 2 muestra el modelo lineal que relacionan los dos tamaños de partículas para la época seca.

$$PM_{2.5}= 5,62+0,76*(PM_1) \quad (\text{ec.2})$$

Al correlacionar las variables "Temperatura - T" y el Material Particulado de menor tamaño ( $PM_1$ ) se obtiene un coeficiente de correlación simple de Pearson del 29% y un coeficiente de determinación del 8%, evidenciando una correlación leve entre ambas variables en la época seca. La correlación entre las variables "Temperatura - T" y el Material Particulado  $PM_{2.5}$  evidencian una mayor incidencia con un coeficiente de correlación simple de Pearson del 31% y el coeficiente de determinación del 1%. (ver Anexo 1)



**Figura 24.** Correlación en la época seca entre  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$

**Tabla IV.** Correlaciones entre los dos tamaños de partícula, temperatura y velocidad del viento - Época seca.

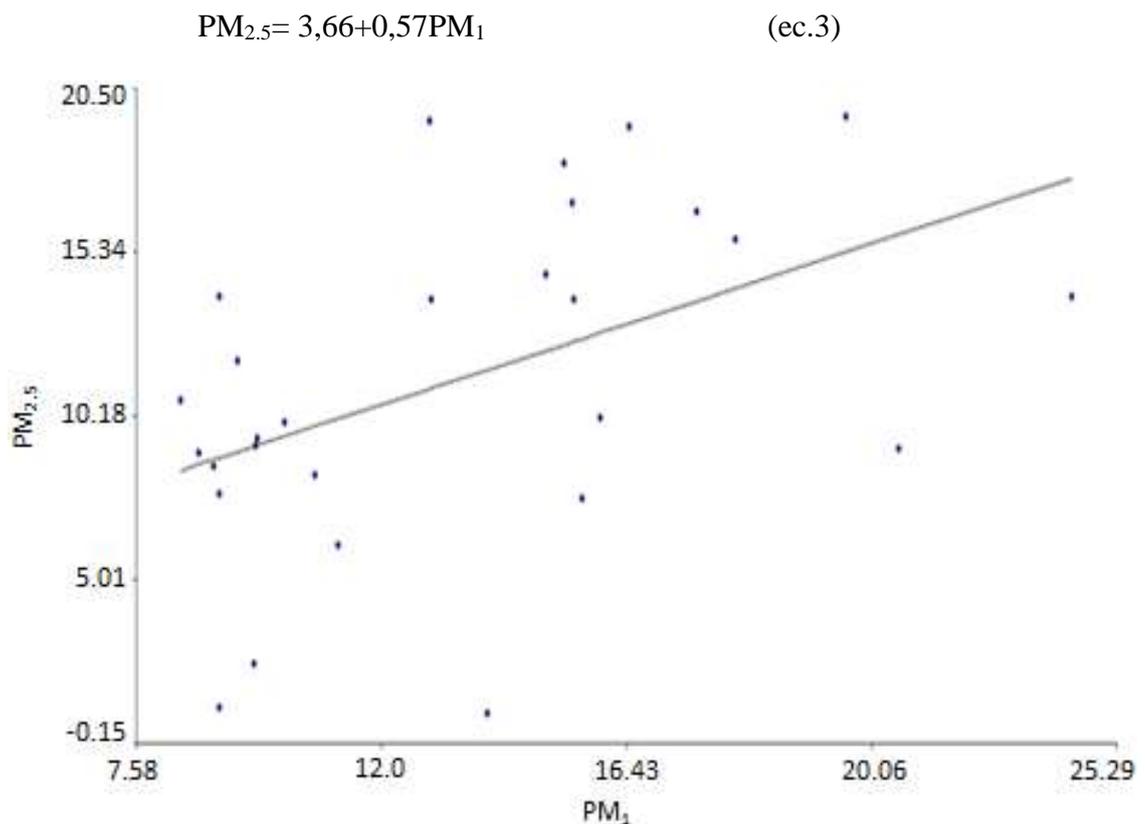
	PM <sub>1</sub> -24h		PM <sub>2.5</sub> -24h		T		v	
	<i>r</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>	<i>r</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>	<i>r</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>	<i>r</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>
<b>PM<sub>1</sub></b>	-	-	0,55	0,30	0,29	0,08	0,16	0,003
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	0,55	0,30	-	-	0,31	0,01	0,20	0,04
<b>T</b>	0,29	0,08	0,31	0,01	-	-	-	-
<b>v</b>	0,16	0,003	0,20	0,04	-	-	-	-

**Tabla V.** Correlaciones entre los dos tamaños de partícula, temperatura y velocidad del viento - Época lluvia.

	PM <sub>1</sub>		PM <sub>2.5</sub>		T		v	
	<i>r</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>	<i>r</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>	<i>r</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>	<i>r</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>
<b>PM<sub>1</sub></b>	-	-	0,47	0,22	0,04	0,0019	-0,04	0,0015
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	0,47	0,22	-	-	0,17	0,03	-0,04	0,0047
<b>T</b>	0,04	0,0019	0,17	0,03	-	-	-	-
<b>v</b>	-0,04	0,0015	-0,04	0,0047	-	-	-	-

También se correlacionan las variables “Velocidad del viento - v” y el  $PM_1$ . Se obtiene un coeficiente de correlación simple de Pearson del 16% y un coeficiente de determinación del 3%, se evidencia una correlación leve entre ambas variables en la época seca. Nuevamente, se observa mayor incidencia en la correlación entre las variables “Velocidad- v” y el Material Particulado de mayor tamaño ( $PM_{2.5}$ ) con un coeficiente de correlación simple de Pearson del 20% y el coeficiente de determinación del 4%. (ver Anexo 1)

Al evaluar las variables  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  en la época lluviosa, el análisis de correlación lineal simple de Pearson se obtiene un coeficiente de correlación del 47% con una prueba estadística, t - Student significativa y la variable  $PM_1$  con un indicador de probabilidad menor a  $\alpha=0,05$  en la aplicación de la prueba t - Student para el 5% error. La ecuación 3 muestra el modelo lineal que relacionan los dos tamaños de partículas para la época lluvia. (ver figura 25)



**Figura 25.** Correlación en la época de lluvia entre  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$

También, se correlacionan las variables “Temperatura - T” y el Material Particulado  $PM_1$  para la época lluviosa. El coeficiente de correlación simple de Pearson resulta ser 4% y el coeficiente de determinación 0,19%. Se evidencia una correlación muy

leve entre ambas variables en la época seca. Para las  $PM_{2.5}$  el coeficiente de correlación simple de Pearson entre “Temperatura - T” y el este tamaño de partícula es 17% y el coeficiente de determinación del 3%, evidenciando una mayor correlación de la temperatura con las partículas mayores. (ver Anexo 1)

Al correlacionar la “Velocidad del viento - v” y las  $PM_1$  se obtiene un coeficiente de correlación simple de Pearson negativa del -4% y un coeficiente de determinación del 0.15%. Estos valores indican que mayor viento menos concentración de  $PM_1$ , lo cual sería lo esperado ya que mayor viento implica mayor dispersión de los contaminantes y por lo tanto menor concentración de  $PM_1$ : llama la atención que este comportamiento no ocurrió en época seca. Para las  $PM_{2.5}$  el comportamiento fue similar: coeficiente de correlación simple de Pearson de -4.0% y coeficiente de determinación del 0.47%. (ver Anexo 1)

De la revisión de los datos se obtiene que por el aumento de cada unidad de material particulado de  $PM_{2.5}$  se atribuye en un 55% al  $PM_1$  en época seca y del 47% en época lluviosa, es decir si hay una relación significativa entre ambas variables, lo cual está dentro de lo esperado ya que las  $PM_{2.5}$  contienen las  $PM_1$  (Ver tablas IV, V y Anexo 1).

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

- La metodología propuesta permite conocer la calidad del aire en la ciudad de Guayaquil en términos de material particulado fino, ya que se midió la concentración de  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  en cuatro lugares representativos de la ciudad en época de sequía y de lluvia.
- La calidad del aire en términos de  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  mostró ser buena con concentraciones de  $PM_{2.5}$  por debajo de las regulaciones ambientales de la República del Ecuador y de los valores sugeridos por la OMS, los cuales son más estrictas por ser el organismo internacional que se encarga de velar por la salud mundial. Sobre la calidad del aire por  $PM_1$  no se pudo señalar ningún veredicto, ya que no existe regulación nacional ni por organismo internacional sobre este tamaño de partícula.
- Este estudio permitió identificar concentraciones mayores de ambos tamaños de partículas en rangos horarios que se repiten a través de los días de la semana. Estos picos de mayor concentración de material particulado se pueden relacionar con las actividades antropogénicas programadas en cada sector: industrias que empiezan a operar en horas tempranas del día y/o mayor afluencia vehicular en el centro de la ciudad en ciertos horarios.
- La concentración del  $PM_{2.5}$  se vió disminuida de manera importante por la presencia de la lluvia mientras que el material particulado de menor tamaño  $PM_1$  se ve menos afectado por la acción de la lluvia. Pareciera que las  $PM_{2.5}$  son arrastradas por el agua, mientras las  $PM_1$  parecieran comportarse como un gas.
- El estudio sobre la influencia de la dirección del viento y la contaminación por material particulado señala que si la difusión del contaminante estuviera solamente gobernada por la dirección del viento, el contaminante se movería en la dirección del viento.
- Aun cuando las mediciones del material particulado  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  no se muestrean en simultaneo pero si en una semana consecuyente y bajo condiciones de emisiones, meteorológicas topográficas similares, se evidencia que existe una correlación moderada positiva entre los  $PM_1$  y  $PM_{2.5}$  siendo esta menor en la época de lluvia.
- Las correlaciones entre  $PM_1$ ,  $PM_{2.5}$  y las variables meteorológicas; temperatura y velocidad del viento resultaron ser muy leves en la época seca, siendo esta menor en la época de lluvia.

## 6.2 Recomendaciones

- Se recomienda incluir en la Cuarta Comunicación Nacional del Cambio Climático del Ecuador al material particulado superfino ( $PM_{10}$ ) como parámetro del cambio climático en base a la capacidad de adsorción e irradiación de la energía calórica del carbono negro.
- Se recomienda realizar una correlación de variables múltiples con datos registrados anuales para evidenciar una mayor relación entre el material particulado y las variables meteorológicas.
- En la ciudad de Guayaquil se recomienda implementar una red de monitoreo de material particulado para control de la calidad del aire y la influencia del carbono negro para la implementación de políticas ambientales.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

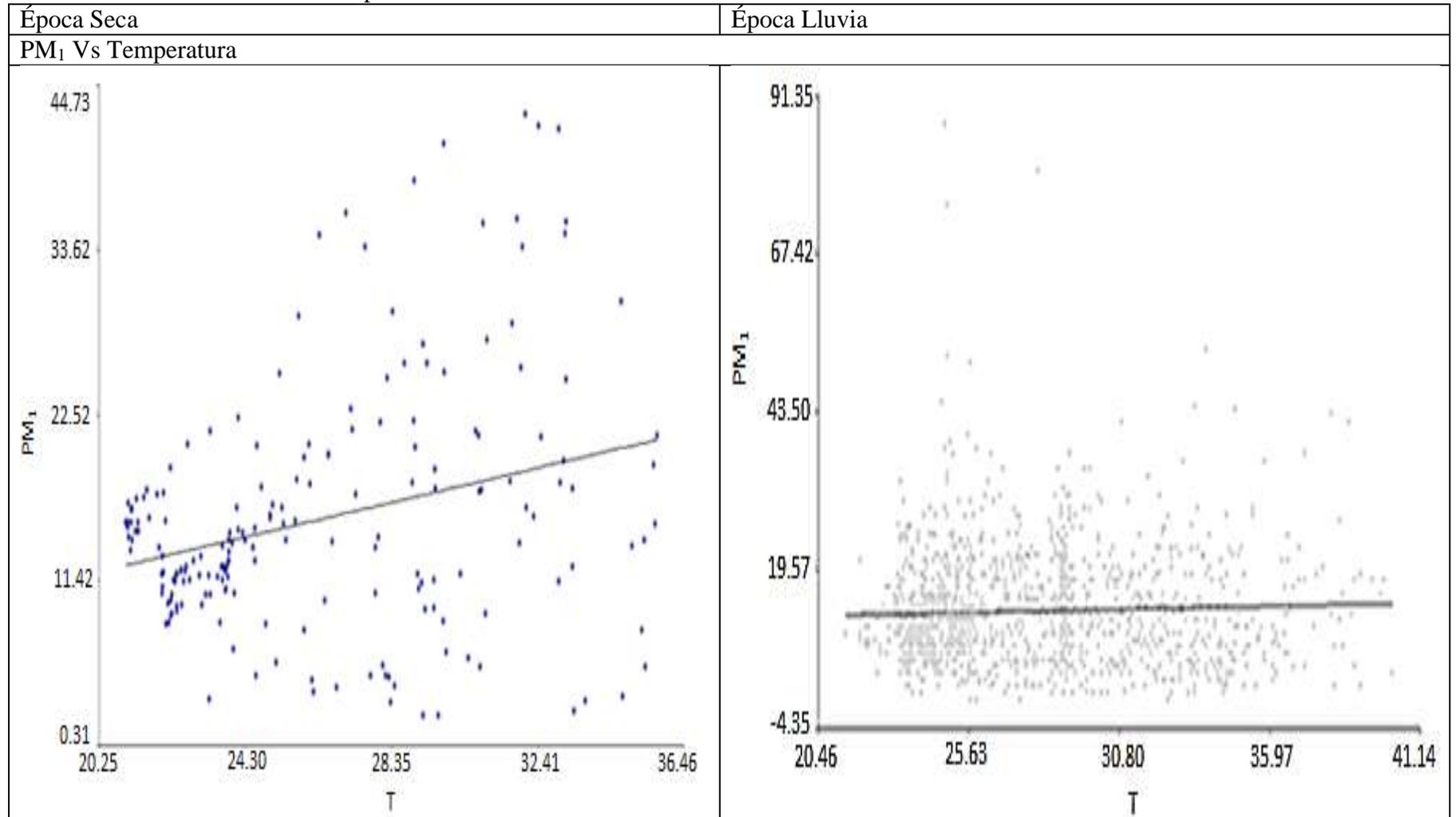
- CCAC. 2012. Short-lived Climate pollutants. Climate & Clean Air Coalition. Disponible *on-line* en: <http://www.ccacoalition.org/en/science-resources>
- Espin G. 2011. Contaminación Atmosférica por el polvo PM-10, producto de la explotación minera y la regeneración urbano-industrial de la Ciudad de Guayaquil. Universidad de Guayaquil. Ecuador.
- Efficacitas. 2007. Plan de Gestión de la Calidad del Aire en la Ciudad de Guayaquil. [https://www3.epa.gov/airnow/air-quality-guide\\_particle\\_SPA.pdf](https://www3.epa.gov/airnow/air-quality-guide_particle_SPA.pdf)
- USEPA. 2015. NAAQS Table. Office of Air and Radiation, US Environmental Protection Agency. Disponible *on-line* en: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
- USEPA. 2016. Particulate Matter (PM) Basics. Office of Air and Radiation, US Environmental Protection Agency. Disponible *on-line* en: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>  
<https://www.epa.gov/air-research/air-monitoring-measuring-and-emissions-research#aqmm>
- USEPA. 2012. Air Quality Guide for Particles. Office of Air and Radiation, US Environmental Protection Agency. Disponible *on-line*
- USEPA. 1991. Risk Assessment for Toxic Air Pollutants: A citizen's Guide. Technology Transfer Network. Office of Air and Radiation, US Environmental Protection Agency. Disponible *on-line* en: [https://www3.epa.gov/ttn/atw/3\\_90\\_024.html](https://www3.epa.gov/ttn/atw/3_90_024.html)
- USEPA. 2003. Particle Pollution and Your Health. Office of Air and Radiation, US Environmental Protection Agency. Disponible *on-line* en: <https://www3.epa.gov/pm/pdfs/pm-color.pdf>
- USEPA. 2008. Introduction to Emission Inventories for Tribes Office of Air and Radiation, US Environmental Protection Agency. Disponible *on-line* en: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/eifortribes2008.pdf>
- USEPA. 2009. Particulate Matter National Ambient Air Quality Standards: Scope and Methods Plan for Health Risk and Exposure Assessment. Office of Air and Radiation, US Environmental Protection Agency. Disponible *on-line* en: <https://www3.epa.gov/ttn/naaqs/standards/pm/data/20090227PMNAAQSREA.pdf>
- USEPA. 2012. Air Emission Sources. Office of Air and Radiation, US Environmental Protection Agency. Disponible *on-line* en: <https://www3.epa.gov/air/emissions/>
- USEPA. 2012. Air Monitoring, Measuring and Emissions Research. Office of Air and Radiation, US Environmental Protection Agency.
- Díaz V, Páez C. 2006. Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras. ACTA NOVA, Vol. 3(2), 308.
- Díaz V. & Páez C. 2006. Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras. Acta Nova, 3(2), 308.

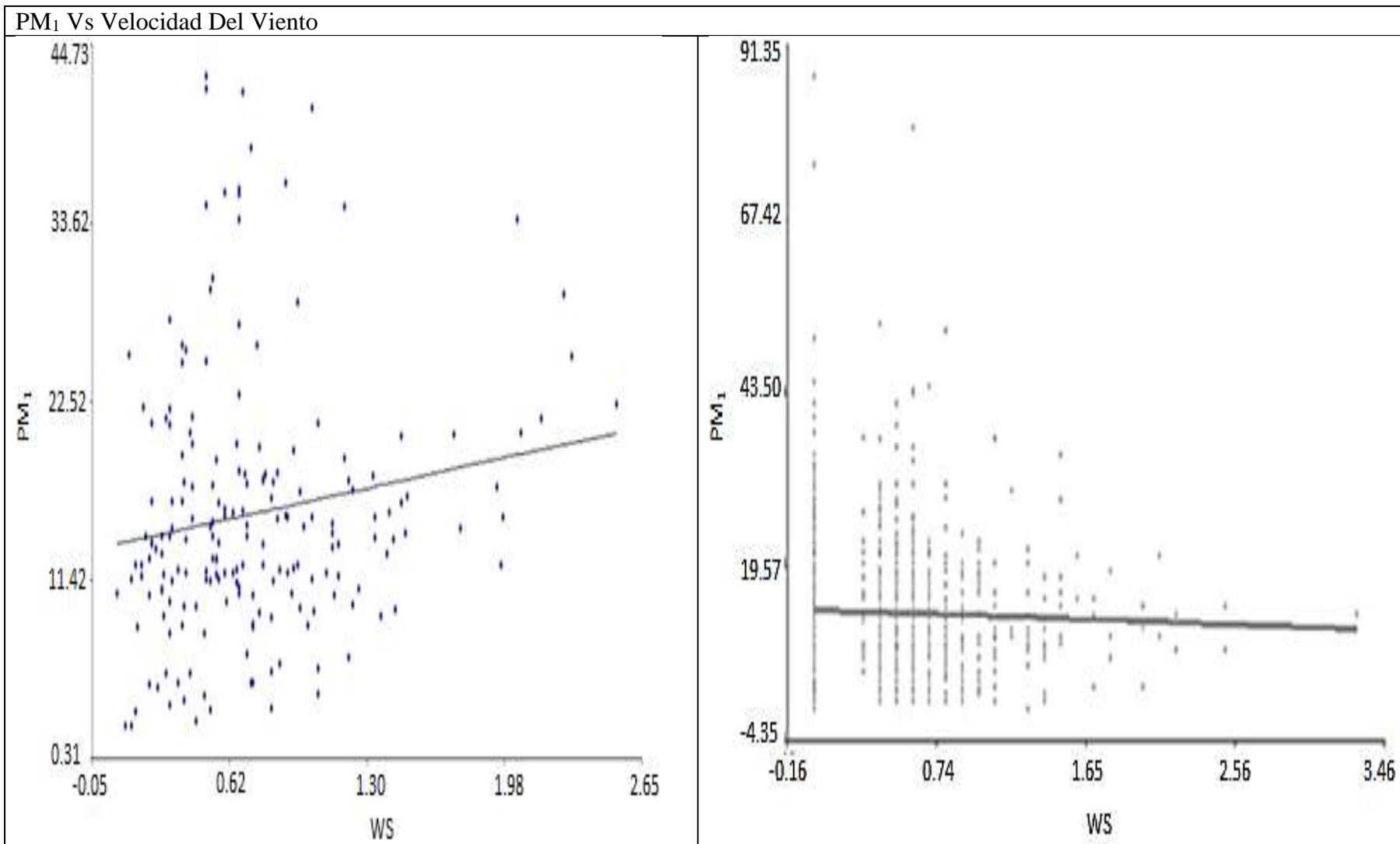
- Centro Mario Molina. 2011. Análisis de Tendencia para Material Particulado en la Región Metropolitana (2008-2010). Informe Final. Chile. Luis Echarri, Población, ecología y ambiente. 2007
- ICCT, The International Council on Clean Transportation. El conocimiento científico actual sobre los impactos del carbono negro en el cambio climático y las estrategias recomendadas para reducir sus emisiones - Una síntesis para la toma de decisiones. 2009
- USEPA, 2016 “black carbon” ”<https://www3.epa.gov/blackcarbon/basic.html> (consultado el 13 - octubre-2016)
- M.I. Municipalidad de Guayaquil, 2016 “<http://www.guayaquil.gov.ec/guayaquil/la-ciudad/geografia>” (consultado el 13 - octubre-2016)
- Allende, D., Pascual, R., Ruggeri, M., Mulena, C., & Puliafito, E. Monitoreo E Identificación De Fuentes De Pm10, Pm2. 5 Y Pm1 En El Área Urbana Y Suburbana Del Gran Mendoza.
- Noemí Pérez, Jorge Pey , Michael Cusack , Cristina Reche , Xavier Querol, Andrés Alastuey & Mar Viana (2010) Variability of Particle Number, Black Carbon, and PM10, PM2.5, and PM1 Levels and Speciation: Influence of Road Traffic Emissions on Urban Air Quality, *Aerosol Science and Technology*, 44:7, 487-499
- Rodríguez, S., Cuevas, E., González, Y., Ramos, R., Romero, P. M., Pérez, N., ... & Alastuey, A. (2008). Influence of sea breeze circulation and road traffic emissions on the relationship between particle number, black carbon, PM1, PM2. 5 and PM2. 5–10 concentrations in a coastal city. *Atmospheric Environment*, 42(26), 6523-6534
- Series, C. O. Black Carbon y sus efectos en el clima.
- Charron, A., & Harrison, R. M. (2005). Fine (PM2. 5) and coarse (PM2. 5-10) particulate matter on a heavily trafficked London highway: sources and processes. *Environmental science & technology*, 39(20), 7768-7776.
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., ... & Kinne, S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11), 5380-5552.
- Lin, J. J., & Lee, L. C. (2004). Characterization of the concentration and distribution of urban submicron (PM<sub>1</sub>) aerosol particles. *Atmospheric Environment*, 38(3), 469-475.
- Johannesson, S., Gustafson, P., Molnár, P., Barregard, L., & Sällsten, G. (2007). Exposure to fine particles (PM2. 5 and PM1) and black smoke in the general population: personal, indoor, and outdoor levels. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 17(7), 613-624.
- Koch, D., & Del Genio, A. D. (2010). Black carbon semi-direct effects on cloud cover: review and synthesis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(16), 7685-7696.
- Masiello, C. A. (2004). New directions in black carbon organic geochemistry. *Marine Chemistry*, 92(1), 201-213.

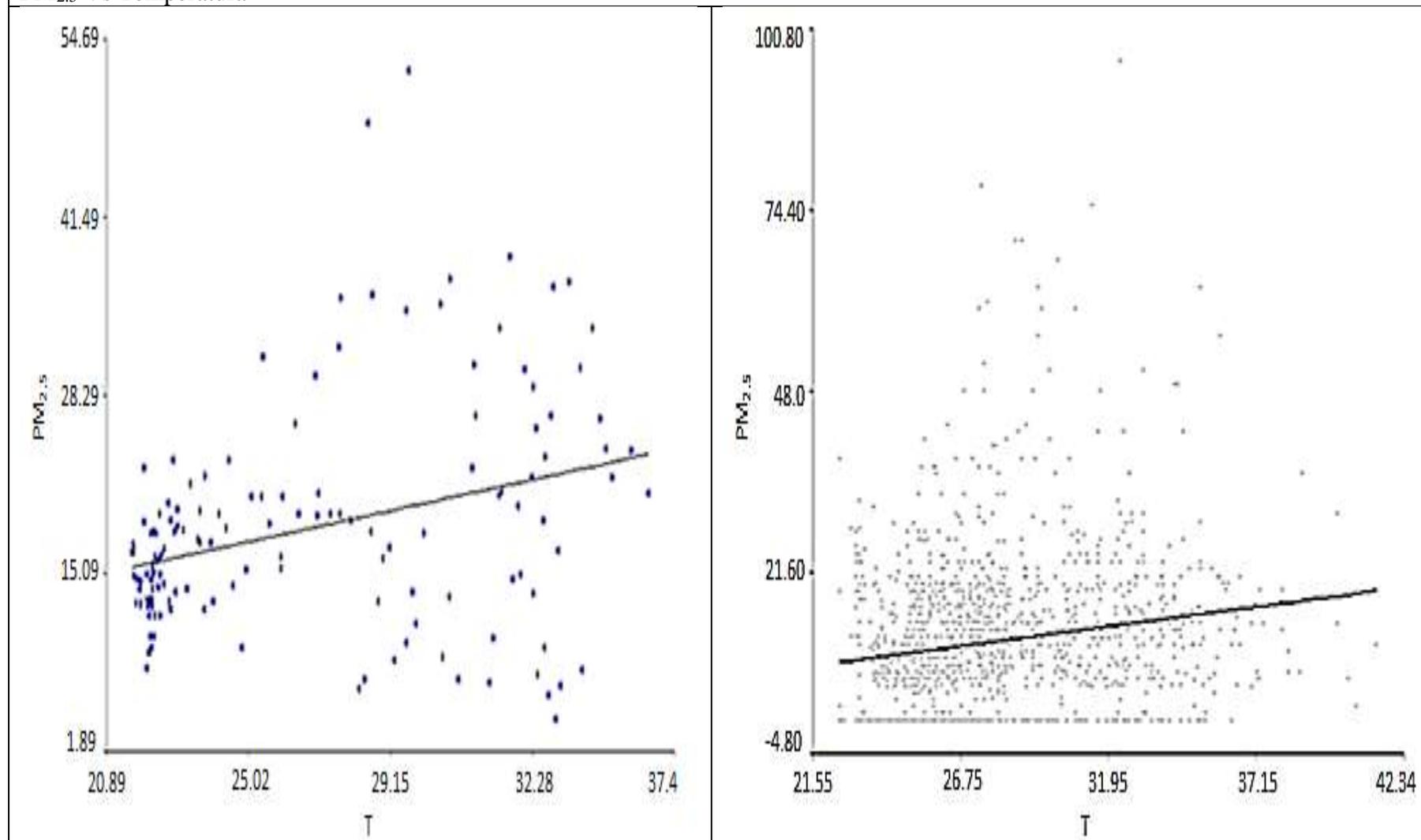
- Schmidt, C. W. (2011). Black carbon: the dark horse of climate change drivers. *Environmental health perspectives*, 119(4), A172.
- Shrestha, G., Traina, S. J., & Swanston, C. W. (2010). Black carbon's properties and role in the environment: A comprehensive review. *Sustainability*, 2(1), 294-320.
- Zeger, S. L., Thomas, D., Dominici, F., Samet, J. M., Schwartz, J., Dockery, D., & Cohen, A. (2000). Exposure measurement error in time-series studies of air pollution: concepts and consequences. *Environmental health perspectives*, 108(5), 419.
- Koch, D., Schulz, M., Kinne, S., McNaughton, C., Spackman, J. R., Balkanski, Y., ... & Chin, M. (2009). Evaluation of black carbon estimations in global aerosol models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(22), 9001-9026.
- Gomišček, B., Hauck, H., Stopper, S., & Preining, O. (2004). Spatial and temporal variations of PM 1, PM 2.5, PM 10 and particle number concentration during the AUPHEP—project. *Atmospheric Environment*, 38(24), 3917-3934.
- Colbeck, I., Nasir, Z. A., Ahmad, S., & Ali, Z. (2011). Exposure to PM10, PM2.5, PM1 and carbon monoxide on roads in Lahore, Pakistan. *Aerosol and Air Quality Research*, 11(6), 689-695.
- Shahsavani, A., Naddafi, K., Haghhighifard, N. J., Mesdaghinia, A., Yunesian, M., Nabizadeh, R., ... & Alimohamadi, M. (2012). The evaluation of PM 10, PM 2.5, and PM 1 concentrations during the Middle Eastern Dust (MED) events in Ahvaz, Iran, from April through September 2010. *Journal of Arid Environments*, 77, 72-83.
- Chakraborty, A., & Gupta, T. (2010). Chemical characterization and source apportionment of submicron (PM1) aerosol in Kanpur region, India. *Aerosol Air Qual. Res.*, 10(5), 433-445.
- Tao, J., Shen, Z., Zhu, C., Yue, J., Cao, J., Liu, S., ... & Zhang, R. (2012). Seasonal variations and chemical characteristics of sub-micrometer particles (PM 1) in Guangzhou, China. *Atmospheric Research*, 118, 222-231.
- Lakes Environmental, 2016  
<https://www.weblakes.com/products/wrplot/?AspxAutoDetectCookieSupport=1>  
 (Consultado el 25-01-2016)
- Tai, A. P., Mickley, L. J., & Jacob, D. J. (2010). Correlations between fine particulate matter (PM 2.5) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM 2.5 to climate change. *Atmospheric Environment*, 44(32), 3976-3984.
- Rubio, M. A., Lissi, E., Riveros, V., & Paez, M. A. (2001). Remoción de contaminantes por lluvias y rocíos en la región metropolitana. *Boletín de la Sociedad Chilena de Química*, 46(3), 353-361.

## 8. ANEXOS

Anexo 1. Gráficos de correlación simple entre variables





PM<sub>2.5</sub> Vs Temperatura

PM<sub>2.5</sub> Vs Velocidad Del Viento