

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

Análisis de la concentración de contaminantes atmosféricos de origen primario y mixto en relación a la variación de las condiciones meteorológicas en el Distrito Metropolitano de Quito

Proyecto de Investigación

Paúl Alejandro Bazante Almeida

Ingeniería Ambiental

Trabajo de titulación presentado como requisito para la obtención del título de Ingeniero Ambiental

Quito, 24 de julio de 2015

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Análisis de la concentración de contaminantes atmosféricos de origen
primario y mixto en relación a la variación de las condiciones
meteorológicas en el Distrito Metropolitano de Quito**

Paúl Alejandro Bazante Almeida

Calificación: _____

Nombre del profesor, Título académico

Dr.-Ing. Ródney Peñafiel

Firma del profesor

Quito, 24 de julio de 2015

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Paúl Alejandro Bazante Almeida

Código: 00025203

Cédula de Identidad: 171746793-8

Lugar y fecha: Quito, julio de 2015

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, por todo el sacrificio y el amor infinito, y por ser mi motivación más grande.

A mi padre, por ser mi más grande maestro.

A mi hermana, por ser más que una hermana, por su constante apoyo y cariño.

A mis profesores de la carrera, por los conocimientos y la confianza.

A mis amigos, gracias por cada paso juntos.

RESUMEN

Un conocimiento apropiado de las dinámicas de contaminación ambiental y las relaciones que guardan con las condiciones atmosféricas es necesario para la elaboración de políticas públicas que tiendan a un adecuado manejo de la calidad del aire. En esa dirección, este documento pretende ser un acercamiento al efecto producido por la variabilidad meteorológica en las concentraciones de contaminantes del aire en la ciudad de Quito. Para esto, se analizó el comportamiento de las concentraciones de cuatro contaminantes del aire (CO, SO₂, NO₂, PM_{2.5}) conjuntamente con cambios en cuatro variables meteorológicas (velocidad de viento, temperatura, radiación solar, precipitación) en el DMQ, entre los años 2006 y 2012.

Se observó que la velocidad de viento es más efectiva con los contaminantes netamente primarios, favoreciendo la disminución de su concentración incluso cuando la temperatura es baja. La velocidad del viento no genera reducción en las concentraciones de PM_{2.5}. La temperatura tiene un papel importante en la reducción de concentraciones de contaminantes primarios en horas de oscuridad, mientras que genera reducciones de contaminantes mixtos en horas de sol. La precipitación genera reducción de concentraciones de contaminantes en una dinámica de presencia-ausencia, en la cual la reducción no es necesariamente mayor con niveles más altos de precipitación; la excepción es NO₂, que puede aumentar su concentración en presencia de precipitación. La radiación solar muestra interacción con NO₂ de acuerdo a lo esperado.

Palabras clave: contaminación del aire, contaminación atmosférica, condiciones meteorológicas, meteorología, calidad del aire.

ABSTRACT

A proper understanding of the dynamics of air pollution and its relationship with atmospheric conditions is needed for the development of public policies aimed at an adequate management of air quality. In that way, this document is intended as an approach to the effect of weather variability in the concentrations of air pollutants in the city of Quito. For this, the behavior of the concentrations of four air pollutants (CO, SO₂, NO₂, PM_{2.5}) was analyzed together with the changes observed in four meteorological variables (wind speed, temperature, solar radiation, precipitation) in DMQ, between 2006 and 2012.

Wind speed was observed to be more effective in reducing the concentration of primary air pollutants, even when the temperature is low. Wind speed didn't cause a reduction on PM_{2.5} concentrations. Temperature plays an important role in reducing concentrations of primary pollutants in hours of darkness, while generating reductions in partially-secondary pollutants in sunshine hours. Precipitation generates reduction in the concentration of air pollutants following a presence-absence dynamic, in which the reduction of the concentration is not necessarily increased with higher levels of precipitation; the exception for this is NO₂, which can increase its concentration in the presence of precipitation. Solar radiation shows an interaction with NO₂ as expected.

Key words: air pollution, atmospheric pollution, meteorology, meteorological conditions, air quality.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Antecedentes	13
1.2. Justificación	14
1.3. Objetivo	15
1.3.1. Objetivo General.....	15
1.3.2. Objetivos Específicos.....	15
2. MARCO TEÓRICO.....	16
2.1. Definiciones	16
2.2. Normativa	16
2.3. Contaminantes	19
2.3.1. Monóxido de carbono	19
2.3.2. Dióxido de azufre.....	21
2.3.3. Óxidos de nitrógeno	24
2.3.4. Material particulado	27
2.4. Meteorología	30
2.4.1. Atmósfera	30
2.4.2. Radiación solar	32
2.4.3. Temperatura.....	35
2.4.4. Viento.....	36
2.4.5. Precipitación	39
2.5. Monitoreo en el DMQ.....	40
3. MÉTODOS.....	42
3.1. Origen de los datos	42
3.2. Delimitación de los datos	44
3.3. Procesamiento de los datos	46
3.3.1. Procesamiento general	46
3.3.2. Cálculo de medianas	47
3.3.3. Análisis preliminar de radiación solar.....	47
3.3.4. Perfiles diurnos	47
3.3.5. Influencia de variables meteorológicas en concentración de contaminantes.....	49
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	52

4.1.	Perfiles diurnos de variables meteorológicas	52
4.1.1.	Velocidad de viento	52
4.1.2.	Radiación solar	56
4.1.3.	Temperatura.....	62
4.1.4.	Precipitación	65
4.2.	Perfiles diurnos de contaminantes	67
4.3.	Influencia de variables meteorológicas en concentración de contaminantes	76
4.3.1.	Velocidad de viento y temperatura	76
4.3.2.	Radiación solar	84
4.3.3.	Precipitación	88
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	92
6.	BIBLIOGRAFÍA	94
	ANEXO A.....	97
	ANEXO B	106

Lista de Figuras

Figura 1. Capas de la atmósfera y variación de la temperatura con la altitud en la misma .32	.32
Figura 2. Espectro solar medido en el exterior de la atmósfera y a nivel de superficie.....34	34
Figura 3. a) Perfil normal de temperaturas en horas de sol, que genera una atmósfera inestable y permite la dispersión de los contaminantes. b) Inversión térmica en horas de la noche, que genera una estabilidad atmosférica y mantiene a los contaminantes atrapados por debajo de la altura de la inversión, evitando su dispersión.38	38
Figura 4. a) Localización del DMQ dentro del Ecuador. b) Área urbana de Quito dentro del DMQ.40	40
Figura 5. Ubicación de las estaciones de monitoreo de la RAUTO en la ciudad de Quito. 42	42
Figura 6. Perfiles diurnos de velocidad de viento correspondientes al año 2009, en las estaciones analizadas.....54	54
Figura 7. Perfiles diurnos de medianas horarias de velocidad de viento, realizados con el juego completo de datos para los años analizados (2006-2012).54	54
Figura 8. Perfiles diurnos anuales de medianas horarias de velocidad de viento, en las estaciones analizadas, entre los años 2006 y 2012, superpuestas anualmente.55	55
Figura 9. Series de tiempo de radiación solar a horas específicas, en distintas estaciones, en los años analizados.....57	57
Figura 10. Perfiles diurnos de radiación solar correspondientes al año 2011, en las estaciones analizadas.....60	60
Figura 11. Perfiles diurnos de medianas horarias de radiación solar, realizados con el juego completo de datos para los años analizados (2009-2012).60	60
Figura 12. Perfiles diurnos anuales de medianas horarias de radiación solar, en las estaciones analizadas, entre los años 2009 y 2012, superpuestas anualmente.61	61
Figura 13. Perfiles diurnos de temperatura correspondientes al año 2012, en las estaciones analizadas.63	63
Figura 14. Perfiles diurnos de medianas horarias de temperatura, realizados con el juego completo de datos para los años analizados (2009-2012).63	63
Figura 15. Perfiles diurnos anuales de medianas horarias de temperatura, en las estaciones analizadas, entre los años 2006 y 2012, superpuestas anualmente.64	64

Figura 16. Perfiles diurnos de precipitación correspondientes al año 2008, en las estaciones analizadas.	66
Figura 17. Perfiles diurnos de medianas horarias de precipitación, realizados con los registros diferentes de cero en los años analizados (2006-2012).	66
Figura 18. Variaciones diurnas de los contaminantes analizados durante el año 2007, en diferentes estaciones.	68
Figura 19. Variaciones diurnas de las concentración mediana anual de CO en cuatro estaciones de monitoreo atmosférico de Quito, entre los años 2006 y 2012, superpuestas anualmente.....	69
Figura 20. Variaciones diurnas de las concentración mediana anual de SO ₂ en cuatro estaciones de monitoreo atmosférico de Quito, entre los años 2006 y 2012, superpuestas anualmente.....	70
Figura 21. Variaciones diurnas de las concentración mediana anual de NO ₂ en cuatro estaciones de monitoreo atmosférico de Quito, entre los años 2006 y 2012, superpuestas anualmente.....	71
Figura 22. Variaciones diurnas de las concentración mediana anual de PM _{2.5} en cuatro estaciones de monitoreo atmosférico de Quito, entre los años 2006 y 2012, superpuestas anualmente.....	72
Figura 23. Perfiles diurnos de flujo vehicular en zonas cercanas a las estaciones de monitoreo, como promedio de días laborables.	73
Figura 24. Perfiles de emisiones horarias de a) CO, b) SO ₂ , c) NO _x , en kg de contaminante por hora, durante días laborables.	74
Figura 25. Diagramas de dispersión para concentraciones de contaminantes, velocidad de viento y temperatura, en diferentes estaciones.	79
Figura 26. Diagramas de dispersión para concentraciones de contaminantes, velocidad de viento y temperatura, en diferentes estaciones.	80
Figura 27. Diagramas de dispersión para concentración de CO, temperatura y velocidad de viento, en horas específicas.	82
Figura 28. Diagramas de dispersión para concentración de SO ₂ , temperatura y velocidad de viento, en horas específicas.	82
Figura 29. Diagramas de dispersión para concentración de NO ₂ , temperatura y velocidad de viento, en horas específicas.	83

Figura 30. Diagramas de dispersión para concentración de PM _{2.5} , temperatura y velocidad de viento, en horas específicas.	83
Figura 31. Diagramas de dispersión para concentraciones de NO ₂ , velocidad de viento y radiación solar, en diferentes estaciones.	85
Figura 32. Diagramas de dispersión para a) concentración de NO ₂ y velocidad de viento, b) concentración de NO ₂ y radiación solar, en la estación de Carapungo.	86
Figura 33. Diagramas de dispersión para radiación solar, temperatura y velocidad de viento, en horas específicas. La escala de color representa la concentración de NO ₂	86
Figura 34. Diagramas de dispersión para precipitación y concentración de CO.	89
Figura 35. Diagramas de dispersión para precipitación y concentración de SO ₂	89
Figura 36. Diagramas de dispersión para precipitación y concentración de NO ₂	90
Figura 37. Diagramas de dispersión para precipitación y concentración de PM _{2.5}	90

Lista de Tablas

Tabla 1. Concentraciones máximas sugeridas por la OMS y permitidas por la NECA para varios contaminantes del aire.	18
Tabla 2. Porcentajes de emisión de las fuentes más importantes de CO en el perímetro urbano del DMQ, como promedio de los datos de los Inventarios de Emisiones del DMQ correspondientes a los años 2003, 2007 y 2009.	20
Tabla 3. Porcentajes de emisión de las fuentes más importantes de SO ₂ en el perímetro urbano del DMQ, de acuerdo a los datos del Inventario de Emisiones del DMQ 2003.	23
Tabla 4. Porcentajes de emisión de las fuentes más importantes de SO ₂ en el perímetro urbano del DMQ, como promedio de los datos de los Inventarios de Emisiones del DMQ correspondientes a los años 2007 y 2009.	24
Tabla 5. Porcentajes de emisión de las fuentes más importantes de NO _x en el perímetro urbano del DMQ, como promedio de los datos de los Inventarios de Emisiones del DMQ correspondientes a los años 2003, 2007 y 2009.	26
Tabla 6. Porcentajes de emisión de las fuentes más importantes de PM _{2.5} en el perímetro urbano del DMQ, como promedio de los datos de los Inventarios de Emisiones del DMQ correspondientes a los años 2003, 2007 y 2009.	29
Tabla 7. Composición de la atmósfera cerca de la superficie de la Tierra.	30
Tabla 8. Contaminantes monitoreados en cada estación de la RAUTO. Fuente: ICA 2013/43	
Tabla 9. Ubicación, método de medición, marca y modelo de los equipos que se utilizan en la RAUTO. Basada en Tabla 1.9 de Secretaría de Ambiente, 2014.	43
Tabla 10. Equipos utilizados en la medición de parámetros meteorológicos como parte de la REMET. Basada en la Tabla 1.13 de Secretaría de Ambiente, 2014.	44
Tabla 11. Procedimientos para la generación de gráficos de perfil diurno y figuras resultantes respectivas incluidas en el presente documento.	48
Tabla 12. Procedimientos para la generación de gráficos de diagramas de dispersión comparativos y figuras resultantes respectivas incluidas en el presente documento.	50
Tabla 13. Porcentajes de datos positivos, datos iguales a cero y datos no válidos de radiación solar registrados para ciertas horas entre los años 2009 y 2012, como promedio de los porcentajes individuales de las cuatro estaciones analizadas.	58

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El aire limpio es un requerimiento básico para la salud y el bienestar humano. Actualmente, la contaminación atmosférica representa un problema de salud pública a nivel global, ya que está directamente relacionada con afectaciones a la salud incluso cuando los contaminantes están presentes en bajas concentraciones, causando alrededor de dos millones de muertes prematuras al año (Organización Mundial de la Salud, 2014). A pesar de que en los últimos años se ha realizado un importante esfuerzo por disminuir este riesgo, se estima que aproximadamente un 25% de la población mundial está expuesta a concentraciones altas de contaminantes en el aire que respiran, principalmente en áreas urbanas; los efectos de estas concentraciones recaen con mayor peso en los segmentos más vulnerables de la población (Banco Mundial, 2007).

La contaminación atmosférica genera, además, degradación ambiental, problemas en varios ecosistemas y afectaciones a bienes materiales expuestos a la misma. Los impactos económicos directos e indirectos causados por la contaminación atmosférica representan valores relativamente altos para los países de todo el mundo; estudios realizados por el Banco Mundial (2007) en la región ubican a la contaminación ambiental como la tercera causa de pérdidas económicas generadas por degradación ambiental a nivel general, y primera causa en zonas urbanas, por encima de costos relacionados a problemas considerados tradicionalmente como prioritarios, como la provisión de agua.

1.2. Justificación

Las concentraciones de contaminantes en la atmósfera dependen tanto de la distribución e intensidad de las emisiones como de las condiciones atmosféricas que facilitan o restringen su dispersión (Secretaría de Ambiente, 2014).

El ritmo de crecimiento de la ciudad de Quito, así como la elevación anual del número de fuentes de emisión, especialmente móviles (Secretaría de Ambiente, 2014), hacen necesaria la existencia de políticas públicas tendientes a controlar el aumento de la contaminación del aire en la ciudad. Para la generación de dichas políticas, se requiere un conocimiento apropiado de la dinámica de la contaminación ambiental y las relaciones que guarda con factores como las condiciones atmosféricas (Bustos Ayoví, 2010).

El Municipio de Quito, a través de la entidad encargada del control de la contaminación ambiental en el Distrito, realiza un monitoreo continuo de la calidad del aire en la ciudad, publicando un informe anual con los resultados obtenidos. Dichos informes enfocan su atención en el análisis del cumplimiento de las normativas ambientales vigentes, así como en las variaciones anuales observadas. Dado que no es su objetivo, los informes no incluyen información detallada de las relaciones observadas entre las concentraciones de contaminantes y el comportamiento de las variables meteorológicas.

Si bien se conoce el efecto general que las condiciones meteorológicas pueden tener sobre la concentración de contaminantes, no se conoce de una evaluación específica de estos efectos en la ciudad de Quito. Este documento pretende ser un primer acercamiento al efecto producido por la variabilidad meteorológica en las concentraciones diarias de contaminantes del aire en la ciudad, para obtener una mejor comprensión de las dinámicas existentes y establecer una base que permita generar nuevos estudios en el futuro.

1.3. Objetivo

1.3.1. Objetivo General

Analizar el comportamiento de las concentraciones de cuatro contaminantes del aire de origen primario y mixto (monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y material particulado menor a 2,5 μm) en relación a la variación de las condiciones meteorológicas en el Distrito Metropolitano de Quito, a partir de datos obtenidos por la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito, entre los años 2006 y 2012.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar el comportamiento diurno de las concentraciones de los contaminantes analizados mediante la generación de gráficos de perfil diurno de contaminantes.
- Determinar el comportamiento diurno de cuatro variables meteorológicas: velocidad de viento, temperatura, radiación solar y precipitación, mediante la generación de gráficos de perfil diurno de dichas variables.
- Evaluar la influencia de las variables meteorológicas descritas en las concentraciones de los contaminantes analizados.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Definiciones

Un contaminante atmosférico es una sustancia que se halla en el aire en concentraciones lo suficientemente altas como para causar daños a los seres humanos, a otros animales, a la vegetación o a los bienes materiales (US EPA, 2014). Algunos contaminantes son emitidos a la atmósfera como resultado de procesos naturales, mientras que otros tienen un origen antropogénico; la mayoría de los problemas de contaminación del aire que se presentan en la actualidad están relacionados este último tipo de contaminantes (Bustos Ayoví, 2010).

Los contaminantes del aire pueden clasificarse, de acuerdo a su origen, en primarios y secundarios. Un contaminante primario es aquel que es emitido hacia la atmósfera directamente desde una fuente; un contaminante secundario es aquel que se forma en la atmósfera como resultado de reacciones químicas entre sustancias precursoras. Algunos contaminantes, como el material particulado, pueden tener ambos orígenes, por lo cual su clasificación dentro de una u otra categoría se dificulta (Organización Mundial de la Salud, 2006).

2.2. Normativa

Al hablar de aire no contaminado se hace referencia a la composición que el aire tendría si los seres humanos no causaran ninguna alteración significativa al mismo, composición imposible de determinar de forma cien por ciento eficaz (Vallero, 2008). En la actualidad, se han identificado varios cientos de componentes en la atmósfera, muchos de los cuales son peligrosos o potencialmente dañinos para la salud humana y para el ambiente (Organización Mundial de la Salud, 2006).

Dada la gran cantidad de contaminantes existentes, el control de la contaminación sería dificultoso si se analizaran las concentraciones de cada uno de ellos de forma regular, por lo cual, en 1970, Estados Unidos decidió establecer una serie de contaminantes estándar que sirvieran como indicadores de contaminación del aire; estos contaminante son: material particulado (PM), ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y plomo (Pb) (Vallero, 2008). Varios países alrededor del mundo tomaron acciones similares.

Por su parte, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha publicado guías sobre la calidad del aire que actualmente “constituyen el análisis más consensuado y científicamente respaldado sobre los efectos de la contaminación en la salud” (Secretaría de Ambiente, 2014), que incluyen estándares de calidad del aire para algunos contaminantes. Las concentraciones señaladas por las guías de la OMS son considerados como “niveles aceptables de contaminación” en términos de impactos potenciales a la salud de las personas y los ecosistemas (Organización Mundial de la Salud, 2006). Para algunos contaminantes, como, por ejemplo, el ozono y el material particulado, no se ha podido identificar una concentración umbral a la que los efectos a la salud humana desaparezcan por completo, por lo que al hablar de “niveles aceptables de contaminación” se está asumiendo la existencia de un nivel de riesgo para la población que se considera como tolerable (Organización Mundial de la Salud, 2006).

Las guías de la OMS no constituyen instrumentos legales vinculantes, por lo que se recomienda que cada país adopte sus propios estándares de calidad del aire considerando su propio nivel de desarrollo, generando un balance entre la protección a la salud de sus ciudadanos, la viabilidad tecnológica y consideraciones económicas, políticas y sociales propias de la nación (Organización Mundial de la Salud, 2006). En base a este criterio, en

Tabla 1. Concentraciones máximas sugeridas por la OMS y permitidas por la NECA para varios contaminantes del aire.

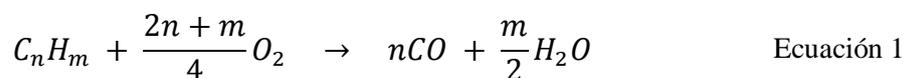
Contaminante	Periodo de medición	OMS	NECA
PM₁₀	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 1 año	20 µg/m ³	50 µg/m ³
PM₁₀	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 24 horas	50 µg/m ³	100 µg/m ³
PM_{2.5}	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 1 año	10 µg/m ³	15 µg/m ³
PM_{2.5}	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 24 horas	25 µg/m ³	50 µg/m ³
SO₂	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 1 año	-	60 µg/m ³
SO₂	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 24 horas	20 µg/m ³	125 µg/m ³
SO₂	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 10 minutos	500 µg/m ³	500 µg/m ³
CO	Concentración en 8 horas consecutivas	-	10 mg/m ³
CO	Concentración máxima en 1 hora	-	30 mg/m ³
O₃	Concentración máxima en 8 horas consecutivas	-	100 µg/m ³
O₃	Concentración media de 8 horas consecutivas	100 µg/m ³	-
NO₂	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 1 año	40 µg/m ³	40 µg/m ³
NO₂	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 1 hora	200 µg/m ³	200 µg/m ³
Benceno	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 1 año	-	5 µg/m ³
Cadmio Anual	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 1 año	-	5x10 ⁻³ µg/m ³
Mercurio inorgánico (vapores)	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 1 año	-	1 µg/m ³

el Ecuador se publicó la Norma de Calidad del Aire Ambiente (NECA), que es parte del Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria, el principal instrumento legal enfocado en políticas ambientales del país, cuya versión vigente data del año 2011. Los niveles máximos de contaminación señalados en dicha Norma constituyen la referencia principal para evaluar la calidad del aire de las distintas regiones del país; estas concentraciones se señalan en la Tabla 1, junto con las recomendadas por la OMS.

2.3. Contaminantes

2.3.1. Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) se caracteriza por ser un gas totalmente incoloro, inodoro e insípido; se genera de forma primaria, como resultado de procesos de combustión incompleta: cuando la proporción de combustible es elevada en relación a la cantidad de aire, el carbono de los combustibles que lo contienen se oxida parcialmente a monóxido de carbono, como se observa en la Ecuación 1, en lugar del proceso de oxidación completa a dióxido de carbono existente en mezclas adecuadas. Este fenómeno se da principalmente en motores de combustión interna a gasolina (Organización Mundial de la Salud, 2006).



En la Tabla 2 se colocan los porcentajes de emisión de las fuentes más importantes dentro del perímetro urbano de la ciudad de Quito; estos valores son promedios de los porcentajes encontrados en los Inventarios de Emisiones Atmosféricas del DMQ de los años 2003, 2007 y 2009, realizados por Corpaire y por la Secretaría de Ambiente.

Tabla 2. Porcentajes de emisión de las fuentes más importantes de CO en el perímetro urbano del DMQ, como promedio de los datos de los Inventarios de Emisiones del DMQ correspondientes a los años 2003, 2007 y 2009.

Fuente	Porcentaje
Fuentes móviles	97.4
Autos total	96.9
Autos gasolina	83.0
Particulares	32.0
Autos diesel	13.9
Transporte aéreo	0.5
Fuentes fijas	1.5
Termoeléctricas	0.8
Combustión otros	0.7
Fuentes área	1.1

El CO interfiere con la capacidad de la hemoglobina para transportar oxígeno a través de la sangre, ya que la proteína presenta una afinidad 200 veces superior por el CO, formando carboxihemoglobina y generando una deficiencia de oxígeno en el cuerpo (Vallero, 2008).

Los efectos más peligrosos están relacionados a la exposición aguda y pueden ir desde dolores de cabeza hasta la muerte, dependiendo de la concentración del gas y del tiempo de exposición al mismo (Organización Mundial de la Salud, 2006). Varios estudios han señalado la existencia de efectos por exposición crónica relacionados a concentraciones mayores de monóxido de carbono en el aire ambiente, especialmente en poblaciones sensibles (Organización Mundial de la Salud, s.f.).

El CO no está considerado dentro de las guías de la OMS para calidad del aire ambiente, aunque sí se lo contempla en relación a la calidad del aire en interiores. Por otra parte, el CO sí aparece en la NECA, de acuerdo a las recomendaciones de “contaminantes criterio” de la EPA; sin embargo, ambas normativas solamente atienden al control de situaciones de exposición aguda, mientras que la exposición crónica no es considerada.

2.3.2. Dióxido de azufre

El dióxido de azufre (SO_2) es un gas incoloro con un olor fuerte característico. Es un contaminante primario, cuya principal fuente es la quema de combustibles fósiles: cuando los combustibles contienen azufre, éste reacciona con el oxígeno durante la combustión, formando el compuesto y liberándolo junto con otros gases generados (Organización Mundial de la Salud, 2006). Fuentes adicionales, aunque menores, incluyen a algunos procesos metalúrgicos y el uso de fertilizantes que contienen azufre (Secretaría de Ambiente, 2014). Las erupciones volcánicas pueden también ser una fuente importante de SO_2 , aunque, gracias a su baja frecuencia, no son fuentes habituales.

Al ser un compuesto fácilmente soluble, los efectos principales del SO_2 se presentan en las estructuras húmedas del cuerpo, como mucosas, ojos, boca y parte superior de los sistemas respiratorios (Bustos Ayoví, 2010). Inicialmente, causa irritación en ojos y garganta; en concentraciones más altas, genera inflamación del tracto respiratorio, causando tos severa, y aumenta la posibilidad de contraer infecciones del sistema respiratorio. Es especialmente perjudicial para personas con afecciones respiratorias preexistentes, tales como asma o bronquitis crónica (Organización Mundial de la Salud, 2014); la exposición aguda es de particular importancia, ya que se han detectado efectos nocivos en periodos tan cortos como 10 minutos, por lo que tanto la OMS como la EPA utilizan estándares de concentración de SO_2 en periodos cortos de tiempo. LA NECA incluye, además, un estándar para concentraciones a largo plazo.

Una vez en la atmósfera, el SO_2 puede reaccionar con el oxígeno, formando trióxido de sulfuro (Ecuación 2). A su vez, este último reacciona con el vapor de agua para formar ácido sulfúrico (Ecuación 3).



Cierta cantidad de ácido sulfúrico producido en el aire se puede disolver en el agua presente en la atmósfera, mientras que otra parte de ácido es producido por este proceso directamente en el agua, a partir de SO_2 previamente disuelto. Al estar diluido, el ácido sulfúrico reduce el pH normal de la lluvia, produciendo lo que se conoce como lluvia ácida. La lluvia ácida afecta gravemente a las plantas, produciendo quemados en su superficie, así como también afectar a los cuerpos de agua, acidificándolos y produciendo efectos graves en los seres vivos que dependen de ellos; este tipo de lluvia, además, puede causar corrosión en varios materiales, deteriorando bienes públicos y privados expuestos. El ácido sulfúrico también se deposita en la superficie en forma de partículas o gas, lo que se conoce como deposición seca; este mecanismo causa efectos similares a los anteriormente descritos. Adicionalmente, el ácido sulfúrico puede reaccionar con varios compuestos para formar sulfatos, que son un componente de la fracción secundaria de las partículas finas (Vallero, 2008).

Las emisiones de SO_2 en el DMQ han sufrido cambios con el tiempo, generados principalmente por la introducción de normativas para el control de la cantidad de azufre contenido en los combustibles. La Ordenanza Municipal 213, del 18 de abril de 2007, señala la prohibición de expender en el DMQ combustibles de uso automotor que no cumplan con las normas INEN 935 e INEN 1486, que limitan la cantidad máxima de

azufre a 1000 ppm en la gasolina Súper, 750 ppm en la gasolina Extra, y 500 ppm en el diesel, conocido como diesel Premium (Secretaría de Ambiente, 2012). En el 2012, la limitación de la cantidad de azufre en los combustibles se extendió a nivel nacional, reduciendo las concentraciones a 500 ppm en diesel y 650 ppm en gasolina, tanto Extra como Súper (Secretaría de Ambiente, 2012).

La Tabla 3 contiene los porcentajes de emisión de las fuentes principales de acuerdo al Inventario de Emisiones del año 2003, mientras que la Tabla 4 presenta el promedio de los porcentajes obtenidos en los Inventarios de Emisiones de 2007 y 2009.

Tabla 3. Porcentajes de emisión de las fuentes más importantes de SO₂ en el perímetro urbano del DMQ, de acuerdo a los datos del Inventario de Emisiones del DMQ 2003.

Fuente	Porcentaje
Fuentes móviles	56.0
Autos total	52.7
Autos gasolina	12.8
Autos diesel	39.9
Pesados	25.5
Buses	13.3
Transporte aéreo	3.3
Fuentes fijas	44.0
Termoeléctricas	25.7
Combustión otros	13.0
Fuentes área	0.0

Tabla 4. Porcentajes de emisión de las fuentes más importantes de SO₂ en el perímetro urbano del DMQ, como promedio de los datos de los Inventarios de Emisiones del DMQ correspondientes a los años 2007 y 2009.

Fuente	Porcentaje
Fuentes móviles	19.3
Autos total	17.1
Autos gasolina	7.4
Autos diesel	9.7
Pesados	6.7
Buses	2.6
Transporte aéreo	2.2
Fuentes fijas	80.6
Termoeléctricas	40.3
Combustión otros	40.3
Fuentes área	0.1

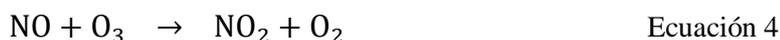
2.3.3. Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno son una serie de compuestos que se generan tanto de forma primaria como secundaria. Los óxidos de nitrógeno más comunes son el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂); conjuntamente son conocidos como NO_x. Ambos son gases incoloros, aunque en concentraciones altas pueden ocasionar un color parduzco en el aire, debido a la absorción de luz en la zona azul y verde del espectro visible (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001).

El NO tiene origen primario; se produce principalmente durante los procesos de combustión que ocurren a temperatura muy alta, en los que el nitrógeno contenido en el aire se oxida por efecto del oxígeno proveniente de la misma fuente. Algunos combustibles fósiles también contienen nitrógeno, que es oxidado en las mismas condiciones. Por lo general, entre 90-95% de los óxidos formados a través de este proceso corresponden a NO, mientras que el 5-10% restante suele ser NO₂ primario (Organización Mundial de la Salud, 2006). Otras fuentes son las plantas procesadoras de ácido nítrico, procesos volcánicos,

actividad bacteriana y la oxidación de nitrógeno y oxígeno atmosféricos por efecto de tormentas eléctricas.

El NO₂, por su parte, tiene un origen mayoritariamente secundario, ya que se produce a partir de la oxidación del NO emitido a la atmósfera. La principal vía de conversión es mediante la reacción con ozono (O₃), vía que, además, puede volver a formar NO en una reacción circular. Las reacciones que normalmente se presentan en la atmósfera se observan en las Ecuaciones 4, 5 y 6 (Organización Mundial de la Salud, 2006).



En presencia de compuestos orgánicos volátiles (COV) se presentan reacciones adicionales, formando ciclos complejos que alteran las proporciones de NO, NO₂ y O₃ existentes en el ambiente (Ahrens, 2009). La radiación solar es también un factor clave en estas reacciones.

La Tabla 5 muestra la composición porcentual de las fuentes primarias de NO_x en el DMQ; no se poseen datos para NO y NO₂ por separado.

Tabla 5. Porcentajes de emisión de las fuentes más importantes de NO_x en el perímetro urbano del DMQ, como promedio de los datos de los Inventarios de Emisiones del DMQ correspondientes a los años 2003, 2007 y 2009.

Fuente	Porcentaje
Fuentes móviles	65.8
Autos total	64.2
Autos gasolina	29.0
Particulares	13.2
Autos diesel	35.2
Pesados	24.0
Buses	11.0
Transporte aéreo	1.6
Fuentes fijas	32.7
Termoeléctricas	27.3
Combustión otros	4.4
Procesos industriales	1.0
Fuentes área	1.5

De los dos gases mencionados, el NO₂ es el más peligroso para la salud humana. Actúa principalmente sobre el tracto respiratorio, causando irritación en la nariz, dificultad respiratoria, dolores respiratorios agudos, bronquitis, y reducción significativa de la resistencia a infecciones respiratorias (Bustos Ayoví, 2010). Concentraciones elevadas en periodos de tiempo cortos pueden causar afectaciones importantes a la salud; los efectos en periodos largos de tiempo no han sido totalmente comprendidos, pero se ha observado alteraciones en la capacidad pulmonar en poblaciones con afecciones crónicas previas, así como relación entre enfermedades pulmonares y niveles de NO₂ en niños e infantes (Organización Mundial de la Salud, 2006). Por esta razón, tanto la OMS como la NECA incluyen valores para exposición aguda y crónica.

El NO₂ puede reaccionar con otros componentes de la atmósfera, generando compuestos reactivos de nitrógeno. Uno de ellos, el ácido nítrico (HNO₃), es también un componente de la lluvia ácida, mientras que otros compuestos son fuentes importantes de material particulado secundario.

2.3.4. Material particulado

Se define al material particulado (PM, por sus siglas en inglés) como cualquier material no gaseoso que, dada su baja tasa de sedimentación gravitacional, permanece suspendido en la atmósfera por periodos apreciables de tiempo (NARSTO, 2004).

El PM es una mezcla compleja de componentes de distinta naturaleza, entre los que se pueden contar polvos minerales (carbón, asbesto, piedra caliza, cemento), polvos metálicos (cinc, cobre, hierro, plomo), cenizas de carbón, neblinas ácidas, partículas de fluoruro, pigmentos de pintura, partículas de plaguicidas, entre otros. Elementos biológicos, como bacterias, polen y esporas, también forman parte de este grupo. Esta heterogeneidad hace que las características físicas y químicas del PM varíen geográficamente, dependiendo de las fuentes que los generan (Organización Mundial de la Salud, 2006).

El PM es clasificado de acuerdo al diámetro aerodinámico de las partículas. Se contemplan dos grupos principales: partículas con diámetro aerodinámico menor a 10 μm , denominado comúnmente como PM_{10} , y partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 μm , conocido como $\text{PM}_{2.5}$; a la fracción correspondiente a $\text{PM}_{2.5}$ se la conoce también como “partículas finas”, mientras que a la diferencia entre PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ se la denomina “partículas gruesas” (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001). Las partículas finas, por su naturaleza, suelen permanecer suspendidas por más tiempo, mientras que las gruesas tienden a asentarse; por esta razón, es común que las partículas finas se dispersen de forma uniforme, mientras que las gruesas se asientan de acuerdo al lugar donde se generan (Organización Mundial de la Salud, 2006).

El material particulado grueso es producido principalmente por acción del viento, que actúa erosionando terrenos descubiertos, suspende partículas provenientes de procesos

agrícolas, caminos no pavimentados y operaciones mineras a cielo abierto, al igual que resuspende polvo depositado en las vías. Cierta cantidad de este contaminante corresponde a cenizas resultantes de procesos de combustión, generadas por materiales no combustibles presentes en estos procesos (Ahrens, 2009).

El material particulado fino puede tener origen tanto primario como secundario. Las fracciones primarias son producidas en procesos de combustión, que incluyen a procesos industriales, generación de energía termoeléctrica, tráfico vehicular (especialmente de vehículos con motores a diesel), incendios forestales y quemas controladas. Las fracciones secundarias son producidas por reacciones fisicoquímicas que se presentan en la atmósfera a partir de gases como el SO_2 y el NO_2 ; estos son oxidados para formar H_2SO_4 y HNO_3 , respectivamente, que a su vez reaccionan con otros componentes atmosféricos para originar sulfatos y nitratos. Estos compuestos forman partículas muy pequeñas que pueden crecer mediante procesos de condensación y coagulación, inicialmente, y mediante crecimiento higroscópico de forma posterior. Ciertos compuestos orgánicos y algunos metales pueden servir también como núcleos para dichos procesos, por lo que también hacen parte del PM (Organización Mundial de la Salud, 2006). La Tabla 10 señala la composición porcentual de las fuentes primarias principales de $\text{PM}_{2.5}$ en el DMQ.

El PM es uno de los contaminantes más peligrosos para la salud de humanos y animales; dada la gran variedad de componentes que lo conforman, cada uno con sus propias características físicas y químicas, sus efectos son diversos y pueden presentarse de distinta manera en lugares distintos. En general, las partículas finas son consideradas como las más peligrosas, ya que, por su tamaño, tienen la capacidad de llegar hasta los conductos pequeños del aparato respiratorio, depositarse en los alveolos y penetrar en el torrente sanguíneo (Secretaría de Ambiente, 2014).

Tabla 6. Porcentajes de emisión de las fuentes más importantes de PM_{2.5} en el perímetro urbano del DMQ, como promedio de los datos de los Inventarios de Emisiones del DMQ correspondientes a los años 2003, 2007 y 2009.

Fuente	Porcentaje
Fuentes móviles	47.7
Autos total	47.4
Autos gasolina	6.8
Particulares	3.6
Autos diesel	40.6
Pesados	28.5
Buses	10.4
Transporte aéreo	0.3
Fuentes fijas	19.9
Termoeléctricas	6.2
Combustión otros	11.1
Procesos industriales	2.6
Fuentes área	32.4
Canteras	9.8
Vías no asfaltadas	6.9
Vías asfaltadas	3.8
Erosión eólica	2.1
Incendios y quemas	7.1

Los efectos del PM se dan sobre todo a nivel de vías respiratorias: a corto plazo, causa irritaciones, disminución de la capacidad respiratoria, y agrava la situación de personas con afecciones respiratorias crónicas; a largo plazo, está asociado al desarrollo de enfermedades cardiovasculares, cáncer y muerte prematura (Organización Mundial de la Salud, s.f.).

La OMS emite recomendaciones de concentraciones máximas, tanto para exposiciones agudas como exposiciones crónicas, para ambas fracciones de PM; sin embargo, advierte que no se ha identificado la existencia de niveles umbral por debajo de los cuales no exista ningún riesgo para la salud humana, por lo cual las concentraciones recomendadas reflejan un nivel en el cual se presenta una cantidad de casos que se consideran aceptables dentro de la población (Organización Mundial de la Salud, 2006). De la misma manera, la NECA controla ambos tipos de exposición para las dos fracciones de PM.

2.4. Meteorología

2.4.1. Atmósfera

La atmósfera es una capa delgada de gases que envuelve al planeta; se extiende por varios kilómetros por sobre la superficie de la Tierra. Tradicionalmente, se considera que no tiene un límite superior, ya que se vuelve menos densa conforme la distancia a la superficie aumenta, diluyéndose eventualmente en el espacio vacío que rodea al planeta (Ahrens, 2009); sin embargo, el 99.9% de la masa de la atmósfera se concentra por debajo de los primeros 50 km (Wallace & Hobbs, 2006).

La atmósfera mantiene una composición más o menos constante, ya que sus componentes mayoritarios presentan pocas variaciones en su concentración de un sitio a otro; este es el caso del nitrógeno, el oxígeno y los gases nobles. Otros gases, por el contrario, varían ampliamente su concentración de acuerdo a la situación geográfica y la altitud (Ahrens, 2009). La composición típica de la atmósfera a nivel de la superficie se observa en la Tabla 7; esta mezcla de gases es conocida también como aire.

Tabla 7. Composición de la atmósfera cerca de la superficie de la Tierra.
Fuente: Ahrens, 2006

Gases permanentes			Gases variables			
Gas	Símbolo	Porcentaje en volumen (aire seco)	Gas (y partículas)	Símbolo	Porcentaje en volumen	Partes por millón
Nitrógeno	N ₂	78.08	Vapor de agua	H ₂ O	0 – 4	-
Oxígeno	O ₂	20.95	Dióxido de carbono	CO ₂	0.038	385
Argón	Ar	0.93	Metano	CH ₄	0.00017	1.7
Neón	Ne	0.0018	Óxido nitroso	N ₂ O	0.00003	0.3
Helio	He	0.0005	Ozono	O ₃	0.000004	0.04
Hidrógeno	H ₂	0.00006	Partículas	-	0.000001	0.01-0.15
Xenón	Xe	0.000009	CFCs	-	0.00000002	0.0002

La temperatura de la atmósfera varía en relación a la altura; de acuerdo a estas variaciones, se ha dividido a la atmósfera en varias capas, cada una con propiedades y composición específicas. La capa más cercana a la superficie es la tropósfera; se halla entre los 0 y 11 kilómetros de altitud y se caracteriza porque en esta zona, de forma general, la temperatura del aire desciende conforme la altitud aumenta. Cambios en la tendencia de la temperatura a elevarse o disminuir conforme aumenta la altitud marcan los límites del resto de capas, que se denominan como mesósfera, termósfera y exósfera (Ahrens, 2009). En la Figura 1 se observa el perfil general de temperatura atmosférica conjuntamente con las diferentes capas, a excepción de la exósfera.

En cada capa se desarrollan procesos importantes que influyen en las condiciones que se presentan en la superficie terrestre; sin embargo, en el estudio de la contaminación del aire la tropósfera cobra especial importancia, ya que es en ella donde se desarrolla la vida y la mayoría de procesos de emisión, transformación y transporte de contaminantes (Vallero, 2008).

Las interacciones que ocurren entre procesos físicos que se presentan en la atmósfera generan condiciones particulares. Al conjunto de estas condiciones en un lugar y tiempo determinados se lo denomina como “tiempo” o “condiciones meteorológicas”; las condiciones meteorológicas pueden cambiar en el orden de minutos u horas. Si bien estos cambios se presentan constantemente, las condiciones meteorológicas de un lugar suelen presentar patrones repetitivos o típicos, patrones que son reconocibles cuando se observan las condiciones durante un largo periodo de tiempo; estos patrones definen lo que se conoce como “clima” (Ahrens, 2009). Generalmente, se considera que se requieren de por lo menos 30 años de observaciones meteorológicas para definir el carácter climático de un lugar (Wallace & Hobbs, 2006).

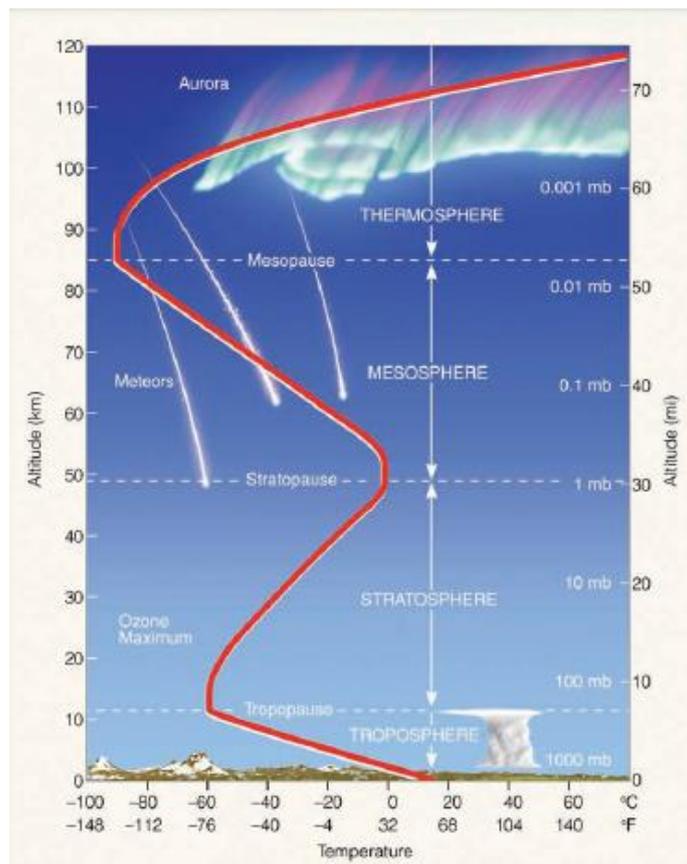


Figura 1. Capas de la atmósfera y variación de la temperatura con la altitud en la misma (representada por la línea roja). Fuente: Ahrens, 2006.

La contaminación atmosférica no depende únicamente de las emisiones directas, sino también de un conjunto de procesos que ocurren de forma posterior a esta liberación. Estos procesos están determinados en gran medida por las condiciones meteorológicas de cada sitio, por lo que el conocimiento y la observación de las variables meteorológicas son indispensables para entender la dinámica de la contaminación atmosférica.

2.4.2. Radiación solar

La radiación solar es la energía emitida por el Sol en forma de ondas electromagnéticas. Todo cuerpo cuya temperatura es mayor al cero absoluto emite radiación (Ahrens, 2009); la cantidad de radiación emitida es una función de la temperatura superficial del cuerpo, tal

como lo señala la ley de Stefan-Boltzmann. A partir de esta ley se puede calcular la denominada “constante solar”, que corresponde a la cantidad total de energía que llega desde el sol hasta la zona externa de la atmósfera. El valor de esta constante es de aproximadamente 1367 W m^{-2} (Ahrens, 2009); sin embargo, este número es solamente un promedio, ya que la cantidad de energía puede variar dependiendo de la posición de la Tierra con respecto al Sol y de la localización sobre la superficie de la Tierra.

La órbita terrestre alrededor del sol es aproximadamente elíptica; debido a la excentricidad de esta órbita, la distancia entre la Tierra y el Sol varía a lo largo del año. La distancia más corta ocurre en mes de enero y se denomina como perihelio, mientras que la distancia más larga se presenta en julio y se conoce como afelio. Este fenómeno causa que la cantidad de radiación sea mayor durante el perihelio y menor durante el afelio (Ahrens, 2009).

La Tierra tiene, además, cierta inclinación con respecto al plano formado por su órbita; esta inclinación se denomina ángulo de declinación solar y varía a lo largo del año. Su valor máximo es de 23.5° y se presenta alrededor del 21 de junio, momento en el que se produce el solsticio de verano en el hemisferio norte, y su valor mínimo es de -23.5° , el cual se presenta alrededor del 21 de diciembre, produciendo el solsticio de invierno en el mismo hemisferio. En los momentos en que el ángulo de declinación solar es igual a 0° se presentan los equinoccios: el de primavera alrededor del 21 de marzo y el de otoño el 21 de septiembre. Esta variación en el ángulo de la Tierra causa que la radiación solar llegue de forma distinta a distintas latitudes dependiendo de la fecha.

Adicionalmente, una vez que entra en la atmósfera, la radiación solar interactúa de diversas formas con los gases y partículas existentes en el aire. El 99% de la radiación solar se emite entre longitudes de onda de $4 \mu\text{m}$ y $0.15 \mu\text{m}$ (Vallero, 2008); del total de la radiación incidente, aproximadamente el 50% llega hasta la superficie del planeta. La mayoría de la

radiación ultravioleta es absorbida, una parte por oxígeno molecular en la termósfera, a 100 km sobre la superficie, y otra parte por el ozono en la estratósfera, entre 20 y 30 km de la superficie aproximadamente. Radiación con longitudes de onda más pequeñas, como los rayos X, son absorbidas a altitudes mucho mayores (Wallace & Hobbs, 2006). Otros gases y partículas dispersan o reflejan cierta cantidad de radiación, enviándola fuera de la atmósfera terrestre o cambiando su dirección. La Figura 2 compara la radiación que llega a la zona externa de la atmósfera con la que se recibe en la superficie terrestre.

La radiación solar influye en muchos procesos atmosféricos, como se explica más adelante, por lo que tiene gran peso en la dinámica de los contaminantes del aire. Además de estos efectos indirectos, la radiación solar interviene en la reacción química de ciertos compuestos; como se mencionó en la sección correspondiente, los óxidos de nitrógeno son parte de estos compuestos, por lo que su concentración se relaciona con la radiación solar.

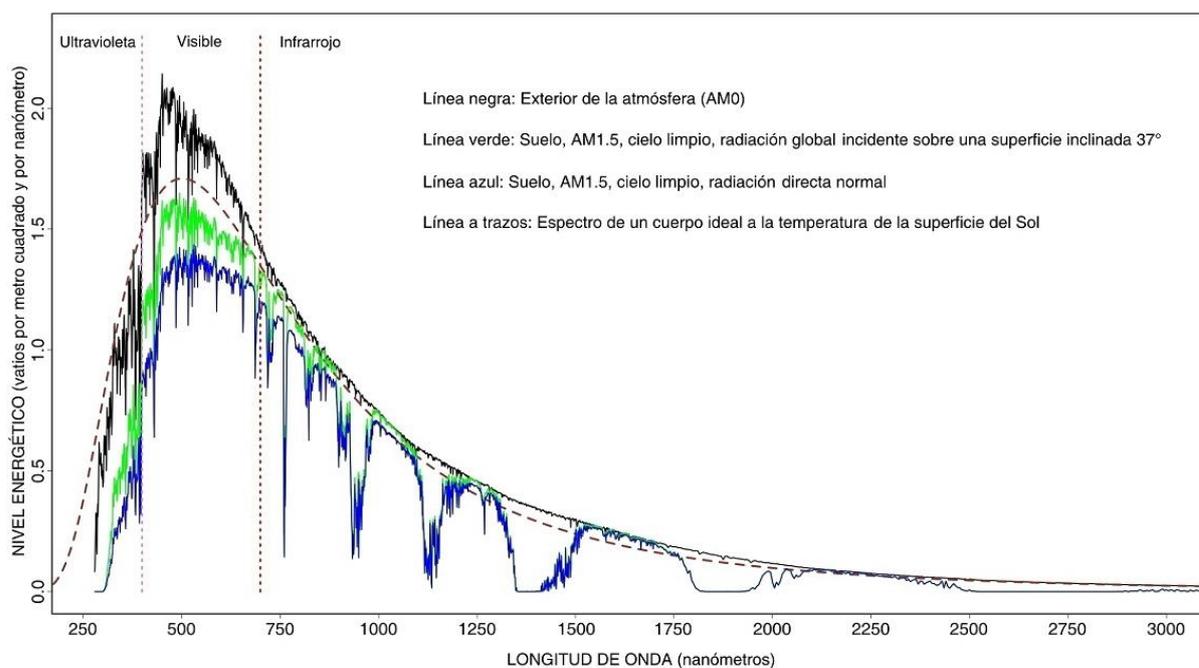


Figura 2. Espectro solar medido en el exterior de la atmósfera y a nivel de superficie.

Fuente: <http://www.censolar.es/especsol.htm>

2.4.3. Temperatura

Al hablar de temperatura como variable meteorológica se hace referencia a la temperatura del aire en un lugar y momento determinados. A nivel de la tropósfera, el aire se calienta principalmente por efecto de la radiación que emite la superficie terrestre, razón por la cual en esta capa la temperatura decrece conforme la altitud aumenta (Wallace & Hobbs, 2006).

La cantidad de radiación que emite la superficie terrestre depende a su vez de la radiación que llega desde el Sol. Como se mencionó, uno de los factores que afectan la cantidad de radiación que alcanza la superficie es la posición del planeta con respecto al Sol. La inclinación de la Tierra con respecto al plano de su órbita, como se explicó en la sección anterior, causa que, durante cierto tiempo, un hemisferio se encuentre más inclinado hacia el Sol que el otro, recibiendo radiación solar durante más tiempo por día. Esto genera que la superficie se caliente más y transfiera más calor, lo que produce las estaciones en las latitudes mayores (Ahrens, 2009).

Otro factor importante es el ángulo de incidencia de la radiación solar; este ángulo se denomina ángulo cenital (θ_s) y está dado por la Ecuación 7, en la que ϕ es la latitud, δ es el ángulo de declinación solar y h es el ángulo hora (Vallero, 2008). Mientras menor sea el ángulo cenital, el Sol se encontrará de forma más perpendicular a la superficie terrestre, por lo que la radiación cubrirá una menor área y tendrá que atravesar una menor cantidad de atmósfera, llegando de forma más efectiva a la superficie.

$$\cos(\theta_s) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta) \cos(h) \quad \text{Ecuación 7}$$

La capacidad reflectiva de una superficie también determina la forma en que ésta puede calentarse; esta capacidad está determinada por el albedo, que es la razón entre la cantidad de energía que llega a la superficie y la que es reflejada. El albedo es una propiedad de cada superficie; por lo general, superficies blancas, como la nieve o las nubes, tienen albedos altos, mientras que superficies opacas tienen albedos bajos. Factores como la distribución de tierras y agua sobre la superficie y las corrientes marinas también influyen en la temperatura de un lugar a través de mecanismos complejos (Wallace & Hobbs, 2006).

La temperatura influye en los procesos atmosféricos que ayudan a la dispersión de contaminantes. Además, está relacionada con la mayor o menor emisión de contaminantes desde motores de combustión interna (US EPA, 2011), así como con aumentos o disminuciones en el uso de combustible (Roberts, Brooks, & Shipway, 2014).

2.4.4. Viento

El viento es el movimiento del aire en relación a la superficie terrestre. Se caracteriza mediante un vector, cuya dirección está conformada por tres componentes: una componente zonal, denotada por u , que comprende los movimientos horizontales a lo largo de un paralelo, una componente meridional, denotada por v , que comprende los movimientos horizontales a lo largo de un meridiano, y una componente vertical, denotada por w , que comprende los movimientos verticales del aire (Wallace & Hobbs, 2006). Para efectos de simplificación se omite el componente vertical, de manera que el vector viento queda definido por la Ecuación 8, donde \vec{i} y \vec{j} son los vectores unitarios de las direcciones zonal y meridional, respectivamente.

$$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j}$$

Ecuación 8

La causa principal de la generación de vientos es la diferencia de presiones existente entre dos puntos, que crea lo que se conoce como un gradiente de presión; el aire se desplaza desde zonas de presión alta hacia zonas de presión baja. Este gradiente es a su vez generado por el calentamiento diferenciado de la superficie terrestre y las masas de aire circundantes en lugares distintos, tal como se explicó previamente.

Además del gradiente de presión, otras fuerzas intervienen en los movimientos de masas de aire, cambiando su dirección y velocidad. Una de ellas es la fuerza de coriolis, una fuerza aparente causada por efecto de la rotación de la Tierra sobre su propio eje que provoca una desviación de la trayectoria del viento. Cuando el viento se produce a nivel del suelo o cerca a éste, la fricción de las superficies existentes genera también un efecto importante sobre el movimiento de la masa de aire (Vallero, 2008).

El viento es uno de los principales factores que afecta a la contaminación ambiental, ya que es capaz de diluir los contaminantes transportándolos lejos de su fuente, así como traer contaminantes de otros lugares o, en el caso del material particulado, ser una de sus causas. En este sentido, la velocidad del viento juega un rol importante, ya que ésta determina qué tan rápido pueden ser transportados los contaminantes (Ahrens, 2009).

Además del transporte horizontal, los movimientos verticales determinan la capacidad de la atmósfera para diluir contaminantes. Normalmente, la temperatura del aire desciende con la altura, por lo que el aire más cálido de la superficie tiende a expandirse, disminuyendo su densidad y elevándose, mientras que el aire frío de alturas superiores se comprime, aumenta su densidad y desciende, generando una mezcla constante en el aire y sus componentes, por lo que se denomina a esta condición como atmósfera inestable. Si esta tendencia se debilita (la temperatura desciende más despacio conforme la altura se eleva) se crea una condición de inestabilidad parcial, en la que la mezcla es limitada.

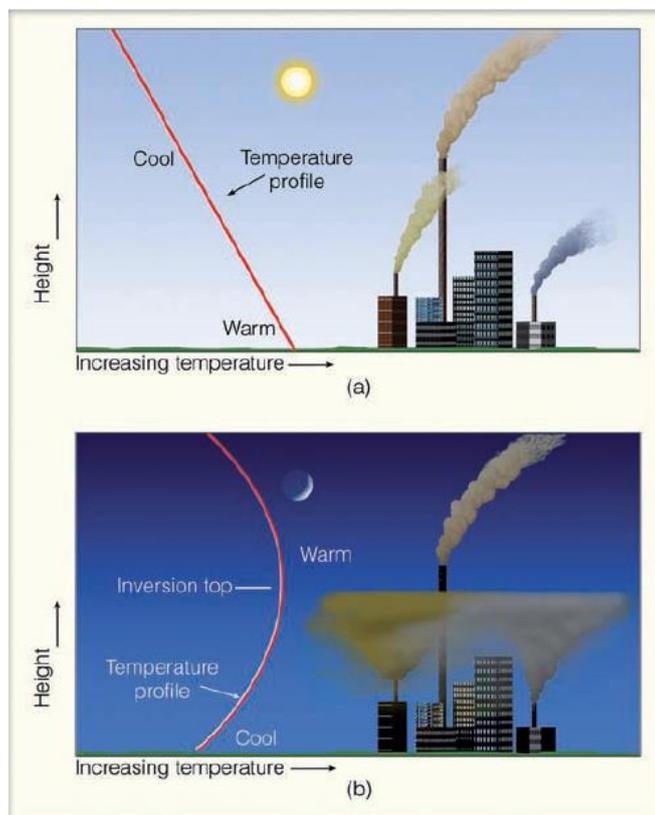


Figura 3. a) Perfil normal de temperaturas en horas de sol, que genera una atmósfera inestable y permite la dispersión de los contaminantes. b) Inversión térmica en horas de la noche, que genera una estabilidad atmosférica y mantiene a los contaminantes atrapados por debajo de la altura de la inversión, evitando su dispersión. Fuente: Ahrens, 2009.

Si la tendencia cambia completamente (la temperatura se eleva conforme la altura aumenta) se produce una inversión térmica, que crea una condición de estabilidad atmosférica impidiendo que el aire se mueva de forma vertical. La altura a la cual se presenta la inversión determina la altura de la capa de mezcla; esta capa corresponde a la zona inferior en la que la atmósfera es inestable y permite los movimientos verticales (Vallero, 2008). Si la altura de la capa de mezcla es baja, la concentración de los contaminantes aumenta, causando episodios de contaminación atmosférica. Uno de los tipos más comunes de inversión se produce en horas de la madrugada y temprano en la mañana, ya que el suelo, a falta de radiación solar, se enfría rápidamente causando que masas de aire frío queden atrapadas cerca del suelo, como se observa en la Figura 3.

La velocidad del viento influye también en los movimientos verticales, ya que vientos fuertes generan turbulencia, provocando remolinos que diluyen los contaminantes al mezclarlos con el aire circundante (Ahrens, 2009).

2.4.5. Precipitación

Precipitación es la caída de agua en cualquier estado desde la atmósfera hacia la superficie (Ahrens, 2009). La precipitación es causada por el movimiento de masas de aire que contienen vapor de agua hacia zonas altas de la atmósfera; en estas zonas, la masa de aire se enfría a través de diversos procesos, lo que genera una disminución en la capacidad de saturación del aire. Como efecto de este fenómeno, el vapor de agua presente en el aire se condensa, formando pequeñas partículas que permanecen suspendidas en el aire, constituyendo las nubes (Ahrens, 2009).

Para condensarse, el agua requiere de una superficie a la cual adherirse; las gotas se forman alrededor de partículas suspendidas en el aire, utilizándolas como núcleos de condensación. Las pequeñas gotas pueden crecer en tamaño al chocar con otras gotas, hasta hacerse lo suficientemente grandes y pesadas para vencer la resistencia del aire y caer a la superficie; de esta manera, la precipitación puede retirar contaminantes del aire y devolverlos a la superficie. Además, como se explicó en la sección correspondiente, algunos contaminantes gaseosos pueden diluirse en el agua o reaccionar con ella, formando ácidos que caen conjuntamente con las gotas y forman la denominada lluvia ácida.

2.5. Monitoreo en el DMQ

El Distrito Metropolitano de Quito se asienta en la provincia de Pichincha, al norte del Ecuador; comprende un área total de 4 228.5 km², de los cuales 425.9 km² corresponden al área urbana y 3 802 km² a zonas rurales y suburbanas (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2014). La zona urbana se localiza en la parte occidental de la cordillera de los Andes, rodeada de montañas que dificultan su ventilación; la altura media en esta zona es de 2 810 msnm; el resto del Distrito tiene alturas variables, que van desde 400 hasta los 5 720 msnm (Secretaría de Ambiente, 2010).

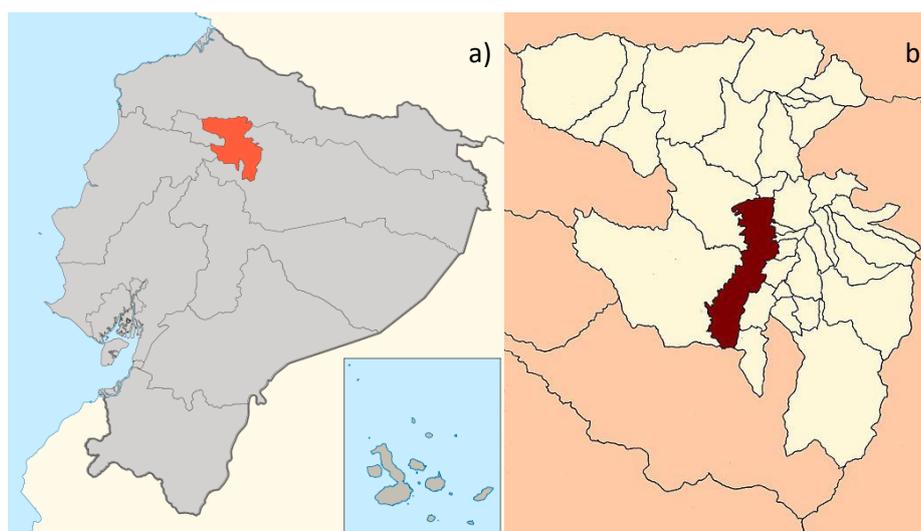


Figura 4. a) Localización del DMQ (zona en color rojo) dentro del Ecuador (zona en gris).
 b) Área urbana de Quito (zona en rojo oscuro) dentro del DMQ. Fuente: Wikimedia Commons

Su población durante el último censo, en el año 2010, fue de 2'239 191 personas en todo el Distrito, mientras que la población urbana fue de 1'619 146 habitantes (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010). La población total proyectada para el año 2014 es de 2'505 344 habitantes (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2011).

La autoridad encargada de la gestión ambiental integral en el DMQ es la Secretaría de Ambiente, entidad adscrita al Municipio de la ciudad. La Secretaría de Ambiente cuenta con una red conformada por seis subsistemas de medición que registran las concentraciones de varios contaminantes en la atmósfera, así como las principales variables meteorológicas y los niveles de ruido. Los subsistemas que conforman la denominada Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ) son: Red Automática (RAUTO), Red de Monitoreo Pasivo (REMPA), Red de Depósito (REDEP), Red Activa de Material Particulado (RAPAR), Red Meteorológica (REMET), y Red de Monitoreo de Ruido Ambiente (REMRA). La red entró en funcionamiento a mediados del 2003 y posee datos válidos desde el mes de enero del año 2004 (Secretaría de Ambiente, 2014); la información se encuentra disponible de forma pública en la página web de la Secretaría de Ambiente.

Hasta mediados del 2014 se publicaban los datos de todas las variables únicamente como promedios horarios; actualmente, los datos son publicados en promedios de 10 minutos, promedios horarios, semihorarios, octohorarios y diarios.

3. MÉTODOS

3.1. Origen de los datos

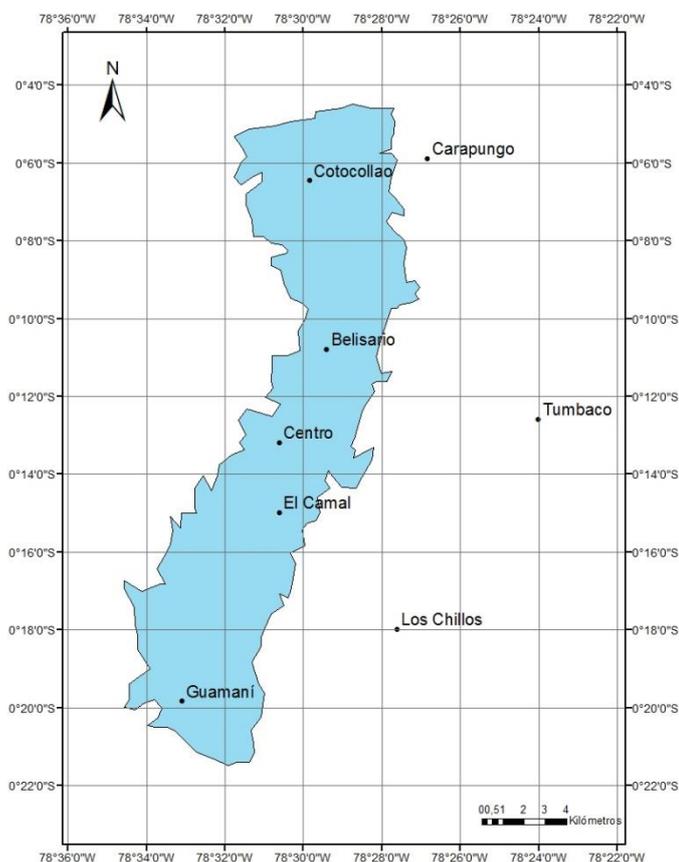


Figura 5. Ubicación de las estaciones de monitoreo de la RAUTO en la ciudad de Quito.

Para el presente trabajo se utilizó información provista por la Red Automática y la Red Meteorológica de la REMMAQ. La RAUTO está conformada por ocho estaciones de monitoreo, ubicadas en distintos puntos del DMQ (ver Figura 5). Las estaciones están equipadas con analizadores de gases y partículas; en la Tabla 8 se detallan los contaminantes monitoreados por cada estación, mientras que en la Tabla 9 se indican los equipos utilizados en el monitoreo. Los datos de las estaciones son enviados de forma automática hacia un centro de control donde los datos son procesados y gestionados.

Tabla 8. Contaminantes monitoreados en cada estación de la RAUTO. Fuente: ICA 2013

Estación	Nomenclatura	Contaminante					
		CO	NO ₂	O ₃	SO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀
Carapungo	Car	x	x	x	x	x	x
Cotocollao	Cot	x	x	x	x	x	
Belisario	Bel	x	x	x	x	x	
Centro	Cen	x	x	x	x	x	
El Camal	Cam	x	x	x	x	x	
Guamaní	Gua	x	x	x			x
Los Chillos	Chi		x	x	x		
Tumbaco	Tum			x	x		x

La REMET trabaja con 6 estaciones, ubicadas conjuntamente con las estaciones automáticas de Carapungo, Cotocollao, Belisario, El Camal, Tumbaco y Los Chillos. Cada estación cuenta con sensores de velocidad y dirección del viento, humedad relativa, radiación solar global, temperatura, presión atmosférica y precipitación. Adicionalmente, en la estación de Guamaní se cuenta con un medidor de precipitación (Secretaría de Ambiente, 2014). En la Tabla 10 se indican los equipos utilizados en la red meteorológica.

Tabla 9. Ubicación, método de medición, marca y modelo de los equipos que se utilizan en la RAUTO. Basada en Tabla 1.9 de Secretaría de Ambiente, 2014.

Contaminante	Ubicación	Método de medición	Marca y modelo
PM ₁₀	Tum, Gua, Car	Atenuación de rayos beta (Método equivalente para PM10 EPA No. EQPM-1102-150)	Thermo Scientific/FH62C14
PM _{2.5}	Bel, Cam, Cen, Cot, Car	Atenuación de rayos beta (Método equivalente para PM10 EPA No. EQPM-1102-150)	Thermo Andersen / FH62C14
SO ₂	Bel, Cam, Cen, Tum, Cot, Car, Chi	Fluorescencia por pulsos de luz ultravioleta (Método equivalente EPA No. EQSA-0486-060)	Thermo 43C / 43i
O ₃	Bel, Cam, Cen, Tum, Chi, Cot, Car, Gua	Absorción de luz ultravioleta (Método equivalente EPA No. EQQA-0880-047)	Thermo 49C / 49i
NO _x	Bel, Cam, Cen, Cot, Car, Gua, Chi	Quimiluminiscencia (Método de referencia EPA No. RFNA-1289-074)	Thermo 42C / 42i
CO	Bel, Cam, Cen, Cot, Car, Gua	Absorción infrarroja no dispersiva (Método de referencia EPA No. RFCA-0981-054)	Thermo / 48C / 48i

Tabla 10. Equipos utilizados en la medición de parámetros meteorológicos como parte de la REMET. Basada en la Tabla 1.13 de Secretaría de Ambiente, 2014.

Parámetro meteorológico	Tipo de equipo utilizado	Marca y modelo
Radiación solar global	Detector tipo termopila / Clase II	Kipp & Zonen / CM3
Presión barométrica	Sensor capacitivo de silicio / Clase I	Vaisala / PTB101B
Temperatura y humedad relativa	Sensor Pt100 para temperatura y sensor capacitivo para HR / Clase II	Thies Clima / 1.1005.54.161
Precipitación pluvial	Báscula oscilante / Clase II	Thies Clima / 5.4032.007
Velocidad del viento	Anemómetro de 3 copas y encoder para generación de pulsos de voltaje de frecuencia proporcional a la velocidad de viento / Clase II	MetOne / 010C
Dirección del viento	Veleta y potenciómetro con señal de voltaje proporcional a la dirección de viento / Clase II	MetOne / 020C

El presente trabajo se realizó a nivel de usuario de datos públicos, ya que los datos utilizados se obtuvieron de la página web de la Secretaría de Ambiente del DMQ; por esta razón, no es posible proveer información acerca de niveles de incertidumbre en las mediciones u otra información similar, más que aquella provista a su vez por la misma institución a la que se hace referencia. Dado que los datos fueron obtenidos de forma previa a la disponibilidad de datos con resolución temporal mayor en el portal virtual público, los datos con los que se trabajó corresponden a promedios horarios, tanto para los contaminantes como para las variables meteorológicas.

3.2. Delimitación de los datos

El presente análisis incluye contaminantes de origen primario y mixto que son medidos por la RAUTO. Para alcanzar los objetivos planteados, se escogieron estaciones que posean información tanto para concentración de contaminantes atmosféricos como para parámetros meteorológicos completos, por lo que las estaciones del Centro y Guamaní fueron excluidas, ya que no poseen información meteorológica completa.

Las estaciones de Tumbaco y Los Chillos no poseen información para todos los contaminantes; adicionalmente, registran una gran cantidad de datos no válidos para los años iniciales del monitoreo, por lo cual tampoco fueron incluidas dentro de las estaciones a utilizarse. De esta forma, las estaciones elegidas para el análisis realizado fueron las de Carapungo, Cotocollao, Belisario y El Camal.

De acuerdo a la información de la Tabla 8, de las estaciones escogidas únicamente Carapungo monitorea la concentración de PM_{10} , razón por la cual este contaminante no se incluye en el presente análisis.

De entre las variables meteorológicas, se escogieron la velocidad y dirección del viento, temperatura, radiación solar y precipitación. La humedad relativa y presión barométrica fueron descartadas para evitar redundancia con las variables ya escogidas, ya que su influencia en la contaminación puede ser medida a través de dichas variables.

Para evaluar la representatividad de los datos se tomó como criterio la necesidad de cubrir el periodo con un mínimo de 75% de datos válidos (Secretaría de Ambiente, 2014) (Carmona, 2013). En el caso de los contaminantes, las estaciones de Carapungo y Cotocollao no tuvieron datos para el año 2004, mientras que las estaciones de Belisario y El Camal presentaron un 31.5% y 33.4% de datos válidos para $PM_{2.5}$, por lo que el año de 2004 fue excluido de los análisis. De forma similar, para el año 2005 las variables meteorológicas en las estaciones de Carapungo y Cotocollao presentaron entre 54.6% y 62.4% de datos válidos, sin contar con la velocidad del viento en Carapungo, que no tuvo datos; por esta razón, el año 2005 también fue descartado. El análisis, por lo tanto, se restringe al periodo de tiempo comprendido entre los años 2006 y 2012.

3.3. Procesamiento de los datos

3.3.1. Procesamiento general

El análisis de los datos se realizó utilizando el software Matlab, en su versión R2010a. Los datos fueron descargados de la página web de la Secretaría de Ambiente en formato CSV (Comma-Separated Values) y fueron convertidos posteriormente en matrices de Matlab. Para el análisis posterior, se crearon scripts individuales para el procesamiento de los datos y la graficación de los mismos.

Se realizó un análisis previo para determinar si los datos utilizados se ajustan a una distribución normal. Para esto, se colocaron los datos tanto de concentración de contaminantes como de variables meteorológicas en gráficos de probabilidad normal; el gráfico correspondiente a la precipitación se realizó excluyendo los datos iguales a cero, mientras que para el resto de variables se utilizó la totalidad de los datos. Se observó que los datos utilizados no siguen una distribución normal; análisis similares demostraron que los datos tampoco se ajustan a distribuciones logarítmicas o exponenciales. Asimismo, se observó la existencia de una gran dispersión en los datos usados, con la presencia de valores extremos.

Por estas razones, conforme a las sugerencias de varias fuentes, el promedio fue descartado como medida de tendencia central en favor de la mediana, ya que esta última permite contrarrestar los sesgos generados por la presencia de datos extremos, así como los efectos causados por la desviación de los datos de la distribución normal (Jacoby, 2005) (Royal Society of Chemistry, Analytical Methods Committee, 2001).

3.3.2. Cálculo de medianas

Se calcularon las medianas de los datos correspondientes a cada hora del día (medianas horarias), agrupando los datos de forma mensual, anual y utilizando la totalidad de los datos, de acuerdo a lo requerido. Los cálculos se realizaron utilizando todos los datos válidos para la mayoría de variables, con excepción de radiación solar y precipitación.

En el caso de la radiación solar se utilizaron los datos del periodo considerado como válido para esta variable (2009-2012), de acuerdo al análisis que aparece en la subsección 4.1.2.

En el caso de la precipitación, dado que ésta se presenta en periodos específicos y cortos de tiempo, la mayor parte de registros son iguales a cero; esto causa que las medianas calculadas con la totalidad de registros sean también iguales a cero, por lo que, para esta variable, las medianas fueron calculadas utilizando solamente los registros positivos. Esto se realizó con el único fin de generar gráficos que permitan observar el comportamiento aproximado de la precipitación a lo largo de un día.

3.3.3. Análisis preliminar de radiación solar

Se identificaron anomalías con valores registrados para radiación solar. Para analizar esto, se filtraron los datos de radiación solar obteniendo los registros de cada hora del día. Estos datos se graficaron en función de la fecha en la que fueron registrados, generando series de tiempo de valores de radiación solar para cada hora.

3.3.4. Perfiles diurnos

Se realizaron gráficos de perfil diurno para cada contaminante y variable meteorológica en cada estación. En estas figuras se graficó el valor de una variable en contra de la hora en la que fue registrada, con el fin de observar la dinámica que sigue la variable a lo largo del

día. Los gráficos de perfil diurno se realizaron agrupando los datos de forma mensual, anual y general (con la totalidad de los datos para el periodo de años analizado).

Los datos graficados corresponden tanto a valores horarios tal como fueron obtenidos de las fuentes previamente descritas, como a valores de medianas horarias calculadas de acuerdo a lo descrito en la subsección respectiva. La Tabla 11 señala el procesamiento requerido para la obtención de los gráficos elaborados, conjuntamente con los números de las figuras respectivas que se presentan en la sección de resultados. Se debe tener en cuenta que en el presente documento se adjuntan únicamente gráficos representativos, de acuerdo a lo que se señala en cada sección correspondiente.

Tabla 11. Procedimientos para la generación de gráficos de perfil diurno y figuras resultantes respectivas incluidas en el presente documento.

Tipo de gráfico	Procedimiento	Figuras resultantes
Series de tiempo de radiación solar a horas específicas	Se filtraron los datos de radiación solar para obtener registros de una hora específica. Se graficaron estos valores en función de la fecha en que fueron registrados.	Figura 9
Perfiles diurnos de datos horarios (precipitación)	Se graficaron los valores horarios correspondientes a un año y estación específicas en función de la hora del día.	Figura 16
Perfiles diurnos de datos horarios (resto de variables)	Se graficaron los valores horarios correspondientes a un año y estación específicas en función de la hora del día. Se añadieron las medianas horarias mediante línea continua.	Figura 6, Figura 10, Figura 13, Figura 18
Perfiles diurnos generales de medianas horarias (precipitación)	Se obtuvieron las medianas horarias de la totalidad de los datos positivos. Se graficaron los valores de las medianas horarias en función de la hora del día, agrupando las medianas de las cuatro estaciones en un mismo gráfico.	Figura 17
Perfiles diurnos generales de medianas horarias (resto de variables)	Se obtuvieron las medianas horarias de la totalidad de los datos válidos. Se graficaron los valores de las medianas horarias en función de la hora del día, agrupando las medianas de las cuatro estaciones en un mismo gráfico.	Figura 7, Figura 11, Figura 14
Perfiles diurnos anuales de medianas horarias	Se obtuvieron las medianas horarias de los datos de cada año. Se graficaron los valores de las medianas horarias anuales en función de la hora del día, por cada estación.	Figura 8, Figura 12, Figura 15, Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22

3.3.5. Influencia de variables meteorológicas en concentración de contaminantes

Para analizar las relaciones entre las concentraciones de contaminantes registradas y las condiciones meteorológicas, se generaron gráficos relacionando ambos tipos de variables.

Ya que en el presente análisis no se incluye información detallada de las emisiones de contaminantes en el DMQ, se intentó aislar el posible efecto de la variación de las emisiones filtrando los datos originales, de acuerdo a las distintas dinámicas que se presentan en la movilización de personas y en la actividad de algunas fuentes de contaminación en días y meses determinados.

De esta forma, se excluyeron los datos correspondientes a días viernes, sábados y domingos, en los que la actividad diaria se presenta de forma distinta (Vallero, 2008), así como los datos correspondientes a los meses de julio, agosto y septiembre, meses en los que las vacaciones escolares cambian las dinámicas antes mencionadas (Secretaría de Ambiente, 2014). Para evaluar la influencia de las variables velocidad de viento, temperatura y radiación solar, se excluyeron los datos de horas que registran precipitaciones mayores a cero, con el fin de evitar que esta variable interviniera con las otras.

Los gráficos fueron realizados obteniendo los datos filtrados para horas específicas, ya que se espera que, después de la filtración realizada, las emisiones sean similares a una misma hora. Se compararon datos de horas en las que se observaron diferencias de concentraciones que no pueden ser explicadas mediante las dinámicas generales de emisiones, obtenidas de los informes de calidad del aire.

Los gráficos realizados y los procedimientos específicos utilizados para elaborarlos se resumen en la Tabla 12.

Tabla 12. Procedimientos para la generación de gráficos de diagramas de dispersión comparativos y figuras resultantes respectivas incluidas en el presente documento.

Tipo de gráfico	Procedimiento	Figuras resultantes
Diagramas de dispersión de dos ejes – Comparación entre horas.	<p>Se filtraron los datos para excluir registros de días viernes, sábados y domingos.</p> <p>Se excluyeron datos de los meses de julio, agosto y septiembre.</p> <p>Se excluyeron también registros de horas en las que se presentó cualquier nivel de precipitación mayor a cero.</p> <p>Se realizó un diagrama de dispersión, colocando la concentración del contaminante en el eje vertical y la variable meteorológica en el eje horizontal.</p> <p>Se graficaron los datos de horas específicas seleccionadas con distinto color para cada hora.</p>	Figura 32
Diagramas de dispersión de dos ejes – Horas específicas	<p>Se filtraron los datos para excluir registros de días viernes, sábados y domingos.</p> <p>Se excluyeron datos de los meses de julio, agosto y septiembre.</p> <p>Se realizó un diagrama de dispersión, colocando la concentración del contaminante en el eje vertical y la variable meteorológica en el eje horizontal.</p> <p>Se graficaron los datos de una única hora.</p>	Figura 34, Figura 35, Figura 36, Figura 37
Diagramas de dispersión de tres ejes – Comparación entre horas.	<p>Se filtraron los datos para excluir registros de días viernes, sábados y domingos.</p> <p>Se excluyeron datos de los meses de julio, agosto y septiembre.</p> <p>Se excluyeron también registros de horas en las que se presentó cualquier nivel de precipitación mayor a cero.</p> <p>Se realizó un diagrama de dispersión con tres ejes, colocando la concentración del contaminante en el eje vertical y las variables meteorológicas en los ejes horizontales.</p> <p>Se graficaron los datos de horas específicas seleccionadas con distinto color para cada hora.</p>	Figura 25, Figura 26, Figura 31, Anexo A
Diagramas de dispersión de tres ejes – Horas específicas (tres variables)	<p>Se filtraron los datos para excluir registros de días viernes, sábados y domingos.</p> <p>Se excluyeron datos de los meses de julio, agosto y septiembre.</p> <p>Se excluyeron también registros de horas en las que se presentó cualquier nivel de precipitación mayor a cero.</p> <p>Se realizó un diagrama de dispersión con tres ejes, colocando la concentración del contaminante en el eje vertical y las variables meteorológicas en los ejes horizontales.</p> <p>Se graficaron los datos de una única hora.</p> <p>Se añadió una gradación de color dependiente de la concentración del contaminante.</p>	Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30

<p>Diagramas de dispersión de tres ejes – Horas específicas (cuatro variables)</p>	<p>Se filtraron los datos para excluir registros de días viernes, sábados y domingos.</p> <p>Se excluyeron datos de los meses de julio, agosto y septiembre.</p> <p>Se excluyeron también registros de horas en las que se presentó cualquier nivel de precipitación mayor a cero.</p> <p>Se realizó un diagrama de dispersión con tres ejes, colocando la radiación solar en el eje vertical y las variables meteorológicas restantes en los ejes horizontales.</p> <p>Se graficaron los datos de una única hora.</p> <p>Se añadió una gradación de color dependiente de la concentración del contaminante.</p>	<p>Figura 33</p>
--	--	------------------

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Perfiles diarios de variables meteorológicas

4.1.1. Velocidad de viento

Los perfiles diarios permiten reconocer comportamientos típicos de las variables analizadas, así como variaciones que se presentan en relación a esos comportamientos. En la Figura 6 se presentan los perfiles diarios de velocidad de viento correspondientes al año 2009 en cada una de las estaciones analizadas, en los que los puntos azules corresponden a datos horarios y la línea negra a la mediana horaria de dichos datos; perfiles para el resto de años, así como perfiles mensuales, muestran comportamientos similares a los observados en estos gráficos, sin desviaciones significativas. La Figura 7 exhibe los perfiles generales de medianas horarias, realizados con la totalidad de los datos correspondientes a los siete años analizados para cada estación, mientras que la Figura 8 muestra los perfiles de medianas horarias anuales, superpuestos para cada estación.

En los perfiles graficados se evidencia una clara relación entre la velocidad del viento y la hora del día, relación que está dada por el vínculo existente entre los movimientos del aire y las dinámicas de presión atmosférica, temperatura y radiación solar a lo largo del día (ver subsección 2.4.4). De forma general, se observan velocidades bajas en horas de la noche y madrugada, que aumentan a partir de las 08h00 horas de forma sostenida, hasta llegar a un pico de velocidades máximas entre las 14h00 y las 16h00 horas; posteriormente, se evidencia una reducción paulatina en horas de la tarde, hasta alcanzar un nivel más o menos estable entre las 21h00 y las 22h00. Las bajas velocidades de viento registradas en horas de la noche y madrugada están relacionadas con la falta de radiación solar y las bajas temperaturas que se generan como consecuencia.

La Figura 6 revela la existencia de una mayor compactación en los datos horarios en las estaciones de Carapungo y El Camal, mientras que en las estaciones de Cotocollao y Belisario se observa una mayor dispersión. En la Figura 7 se observa que tanto en Carapungo como en Cotocollao las velocidades medianas horarias son más bajas que en las estaciones restantes en horas de la noche y madrugada, sin embargo, son más altas en horas de la tarde, entre las 12h00 y las 17h00, presentando picos más elevados.

Los perfiles de medianas horarias anuales, observadas en la Figura 8, mantienen la tendencia general descrita. Las variaciones anuales son pequeñas en Cotocollao y en El Camal, y más pronunciadas en Carapungo. En la estación de Belisario se produce una importante reducción entre los años 2007 y 2008, acompañado de un ligero cambio de tendencia, y de forma posterior a dicho año las variaciones son pequeñas y la tendencia se mantiene; las causas de este efecto no pueden ser determinadas sin mayor información.

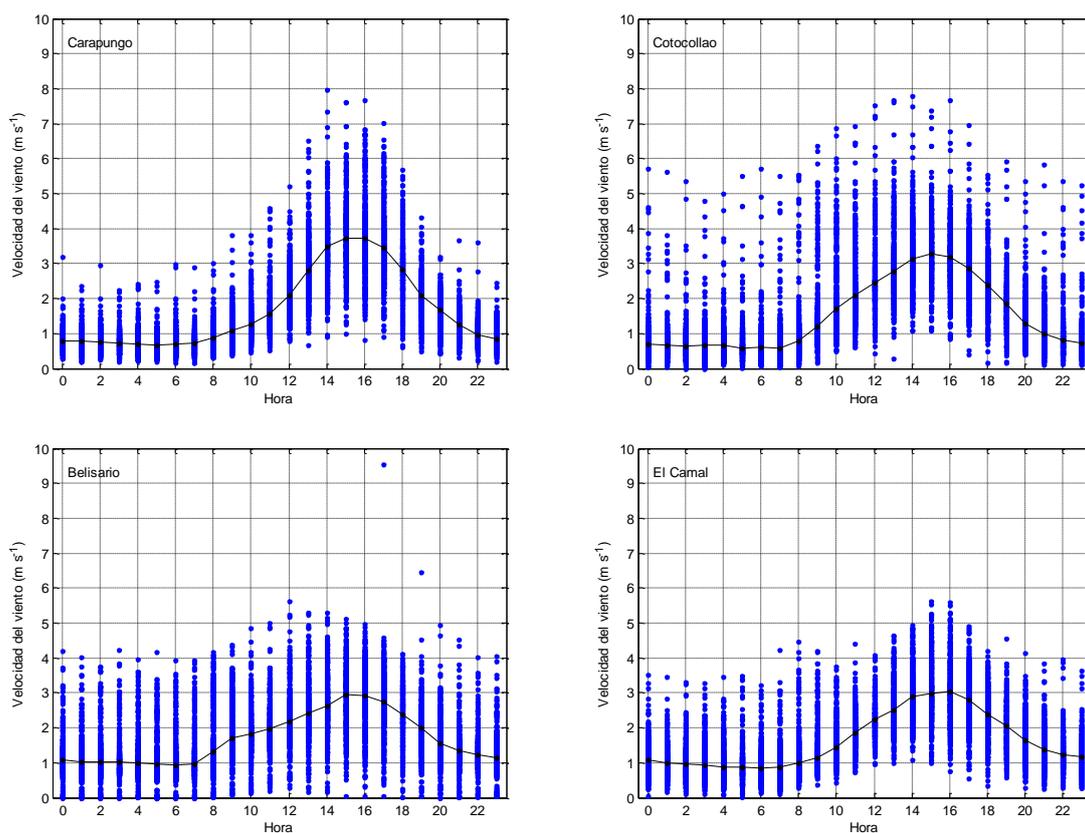


Figura 6. Perfiles diarios de velocidad de viento correspondientes al año 2009, en las estaciones analizadas. Los puntos azules corresponden a los datos horarios y la línea negra a la mediana horaria de dichos datos.

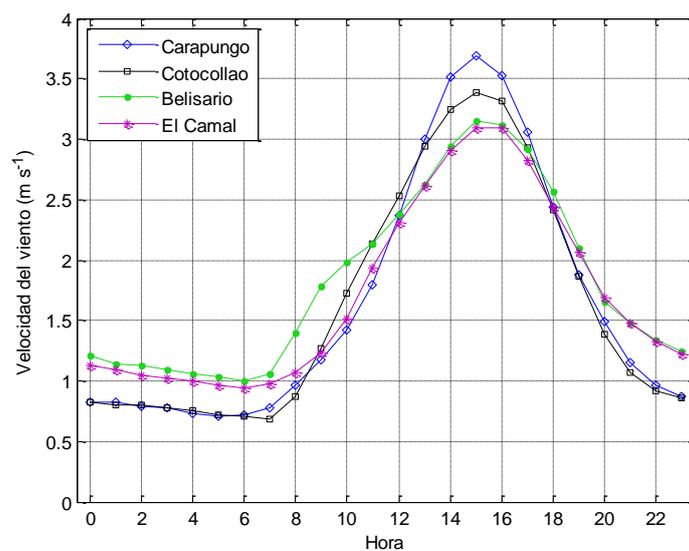


Figura 7. Perfiles diarios de medianas horarias de velocidad de viento, realizados con el juego completo de datos para los años analizados (2006-2012).

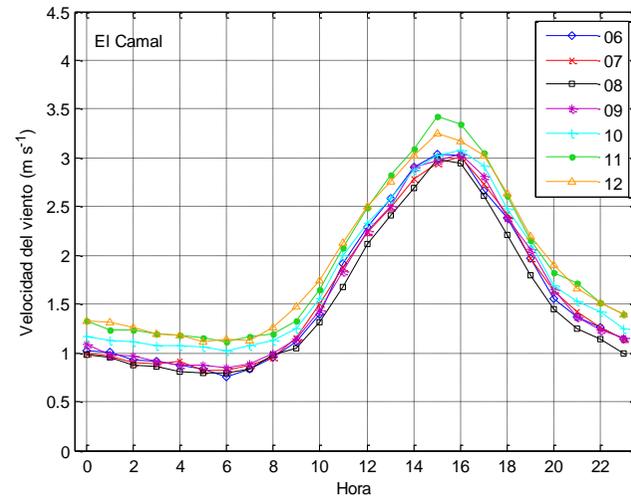
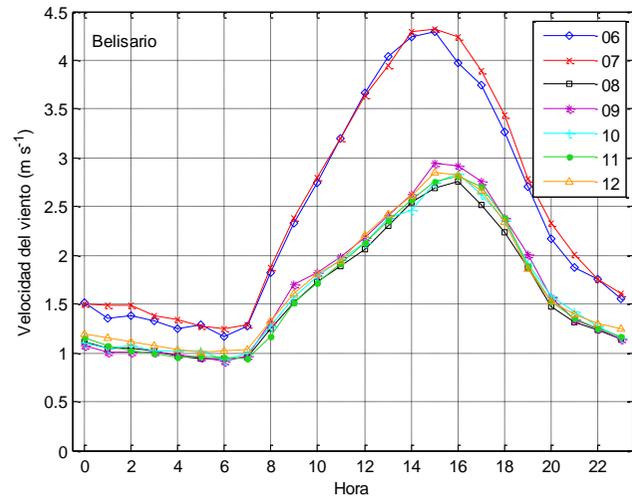
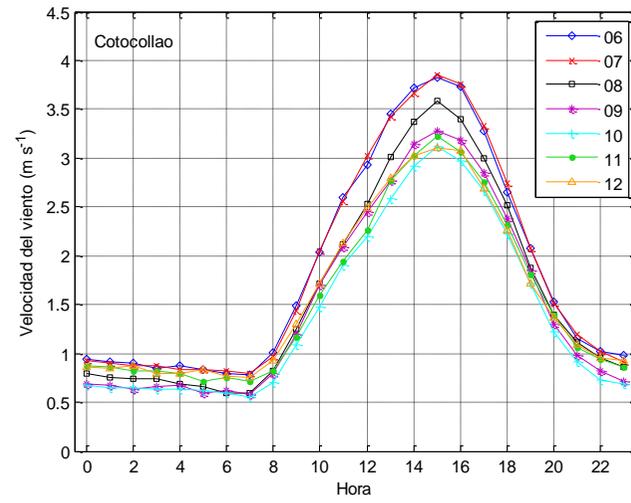
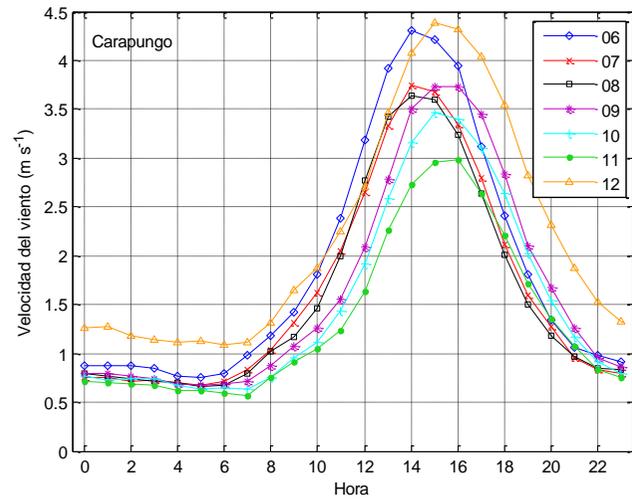


Figura 8. Perfiles diurnos anuales de medianas horarias de velocidad de viento, en las estaciones analizadas, entre los años 2006 y 2012, superpuestas anualmente.

4.1.2. Radiación solar

En la realización de los análisis se identificaron ciertas anomalías en valores registrados para radiación solar. Para analizar de mejor forma estos hallazgos, se generaron gráficos de serie de tiempo individuales con datos de radiación solar de cada hora; en estos gráficos se observa un comportamiento anormal de los datos correspondientes a los años entre 2006 y 2008, ya que estos datos presentan valores muy bajos y con mucha variación en relación a los valores registrados a partir del año 2009. Esto es más visible en horas de la mañana, cuyos gráficos se presentan en la Figura 9.

Estos valores extraños pueden deberse a fallas en el funcionamiento de los sensores o interferencias de otras fuentes de radiación, sin embargo, no se puede ofrecer una explicación más precisa sobre las causas de estas anomalías, ya que no se posee información suficiente. Debido a estas observaciones, se decidió omitir la información correspondiente a los años 2006, 2007 y 2008 de los análisis realizados con radiación solar, limitando los datos válidos al periodo 2009 – 2012.

Para los análisis pertinentes se requiere conocer la hora de salida y puesta del Sol en el DMQ, de forma que se pueda diferenciar las horas de sol de las horas sin radiación solar. Para esto, se calcularon los porcentajes de datos con valores positivos, con valores de cero y registros no válidos durante cada hora del día; la Tabla 13 resume los resultados como porcentajes promedio de los porcentajes individuales de las cuatro estaciones analizadas, para horas específicas.

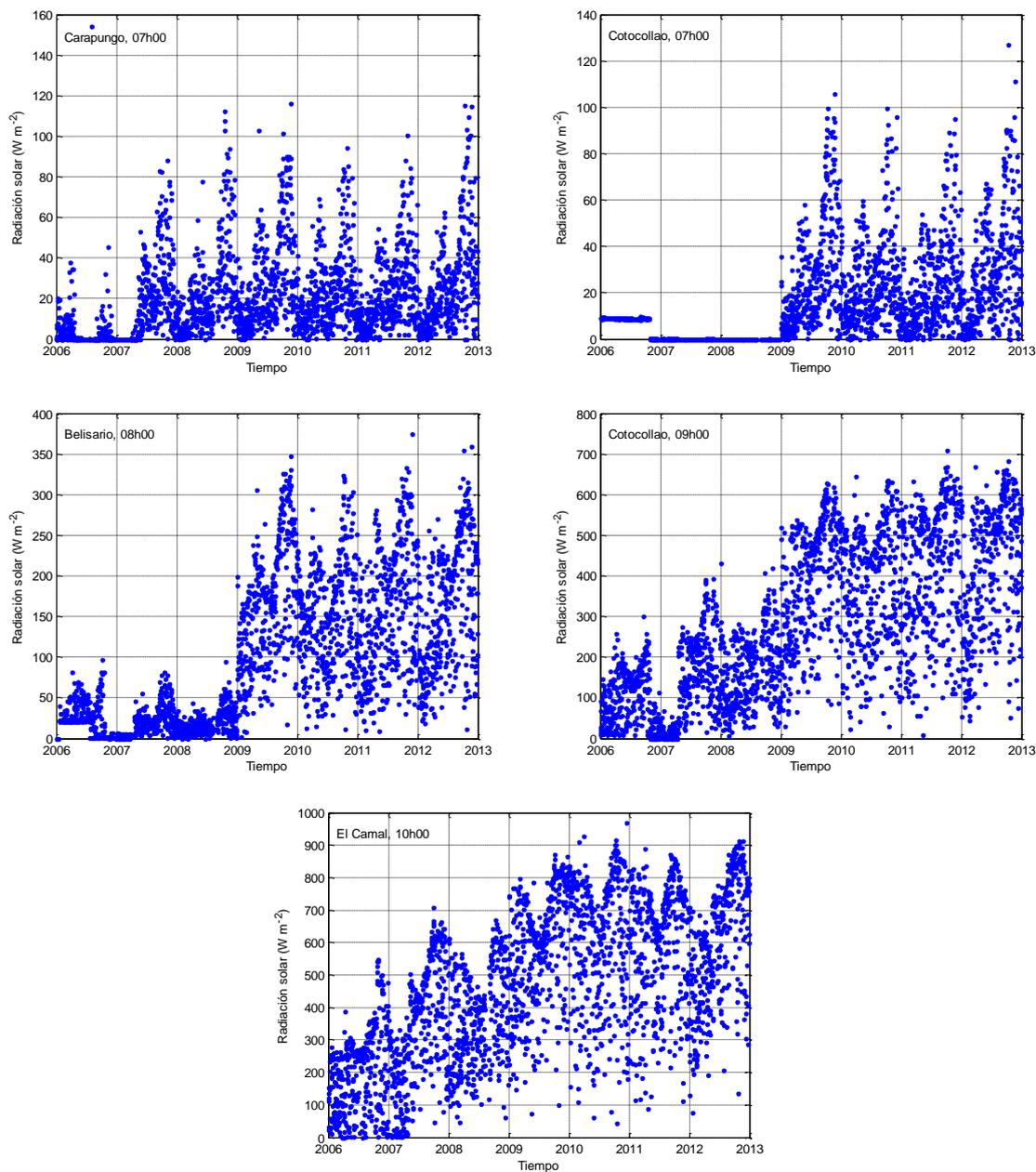


Figura 9. Series de tiempo de radiación solar a horas específicas, en distintas estaciones, en los años analizados.

Tabla 13. Porcentajes de datos positivos, datos iguales a cero y datos no válidos de radiación solar registrados para ciertas horas entre los años 2009 y 2012, como promedio de los porcentajes individuales de las cuatro estaciones analizadas.

	Hora	Datos positivos	Datos iguales a cero	Datos no válidos
Salida del sol	06h00	4.4%	95.2%	0.4%
	07h00	98.7%	0.8%	0.5%
	08h00	99.5%	0.0%	0.5%
Puesta del sol	18h00	98.0%	1.3%	0.7%
	19h00	54.4%	45.1%	0.5%
	20h00	4.2%	95.3%	0.5%

A las 06h00 horas se observa un porcentaje bajo, de apenas 4.4%, de datos positivos, porcentaje que se eleva a 98.7% a las 07h00 horas; asimismo, a las 18h00 horas se registra un 98.0% de datos positivos, descendiendo rápidamente a 54.4% a las 19h00 horas. Por esta razón, se designa como horas de sol a aquellas comprendidas entre las 07h00 y las 18h00 horas.

En la Figura 10 se presentan los perfiles diurnos de radiación solar durante el año 2011, que son representativos del resto de años analizados; la tendencia observada es intuitiva, ya que, tal como se espera, la radiación solar aumenta conforme las horas del día avanzan hasta alcanzar un pico alrededor de la hora 12h00, en que el sol está su cénit, disminuyendo después hasta el momento de ocultarse. Esta figura permite también observar gráficamente las horas de salida y puesta del sol, que coinciden con las señaladas previamente. En esta figura se observa también una alta dispersión de los valores de radiación registrados para cada hora; una explicación para este fenómeno es la naturaleza de los datos, ya que, al promediar los datos de toda una hora, registros muy bajos causados por el paso de una nube (evento que puede durar pocos minutos) pueden sesgar el valor promedio hacia un número muy bajo. A pesar de esto, existen registros muy bajos para

horas de sol, lo cual puede sugerir la existencia de algún error en los datos, algo que no puede ser verificado en las condiciones de este estudio.

La Figura 11 exhibe los perfiles de medianas de la totalidad de los datos analizados. Estos gráficos permiten ver que existe poca diferencia entre la radiación solar que reciben las distintas estaciones de monitoreo. La mayor radiación se presenta en Carapungo y Cotocollao y la menor en Belisario y El Camal, sugiriendo una radiación solar ligeramente mayor en el lado norte de la ciudad de Quito en relación al lado centro-sur; esta pequeña diferencia puede deberse a los microclimas distintos de cada zona, específicamente en relación con la nubosidad existente en estos lugares.

Las variaciones anuales, como se observa en la Figura 12, son pequeñas en general, aunque son más pronunciadas en las estaciones mencionadas previamente, es decir, Carapungo y Cotocollao. La tendencia general se mantiene.

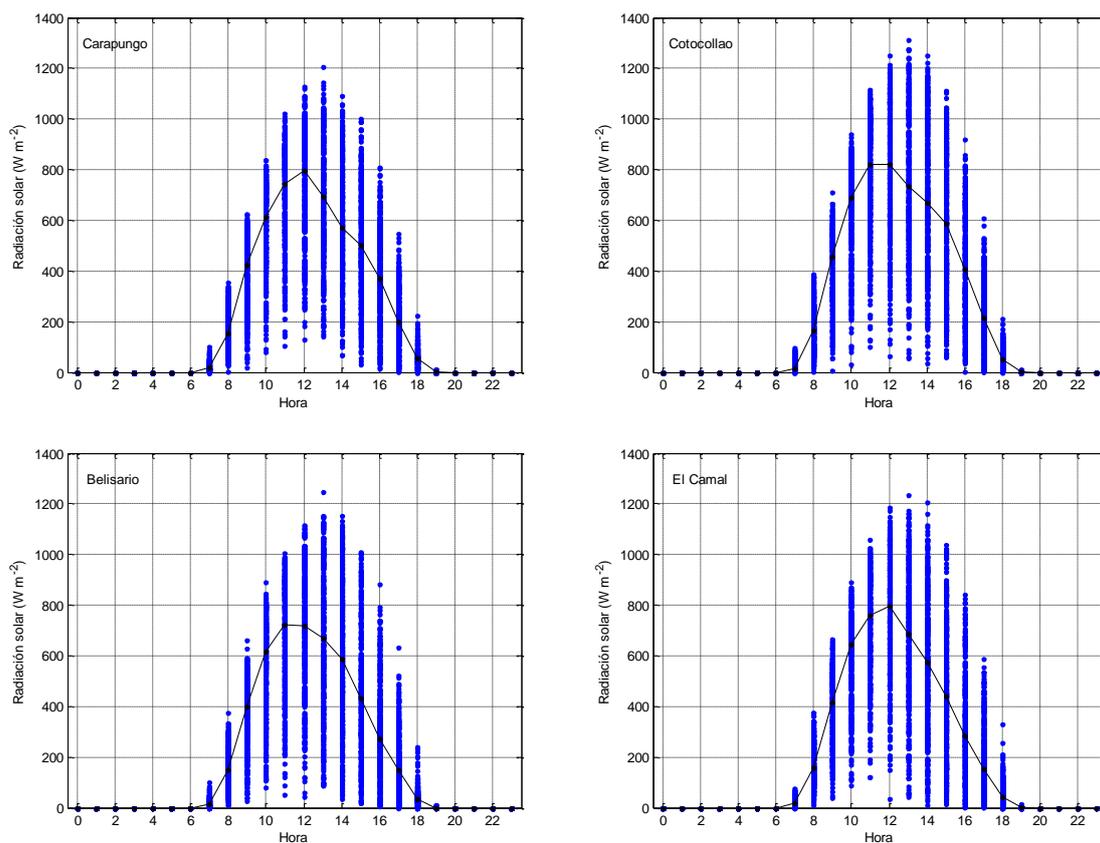


Figura 10. Perfiles diarios de radiación solar correspondientes al año 2011, en las estaciones analizadas. Los puntos azules corresponden a los datos horarios y la línea negra a la mediana horaria de dichos datos.

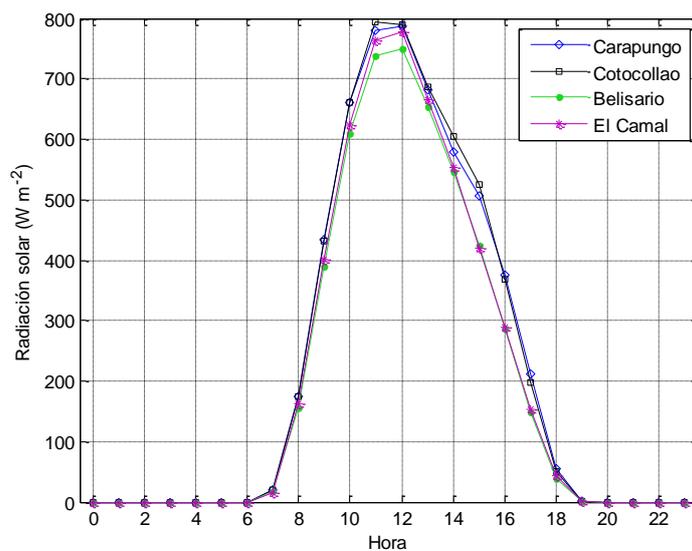


Figura 11. Perfiles diarios de medianas horarias de radiación solar, realizados con el juego completo de datos para los años analizados (2009-2012).

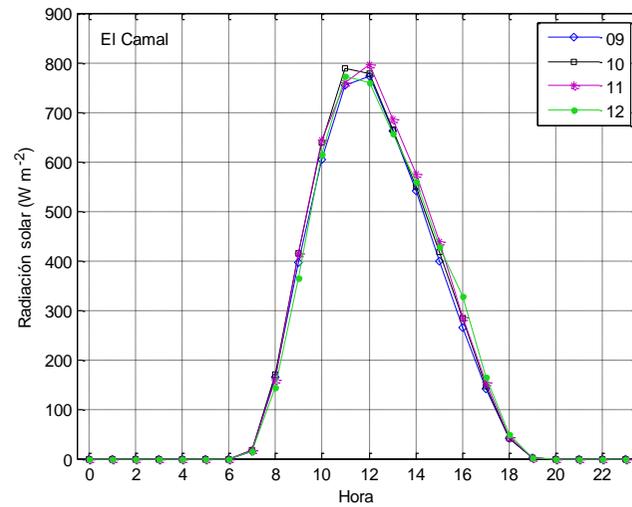
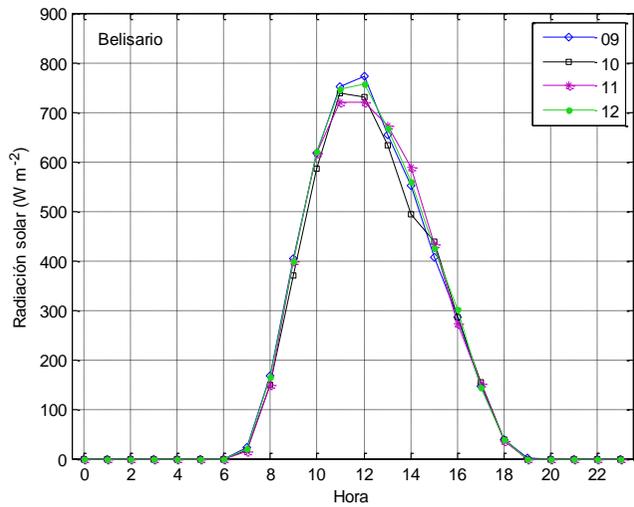
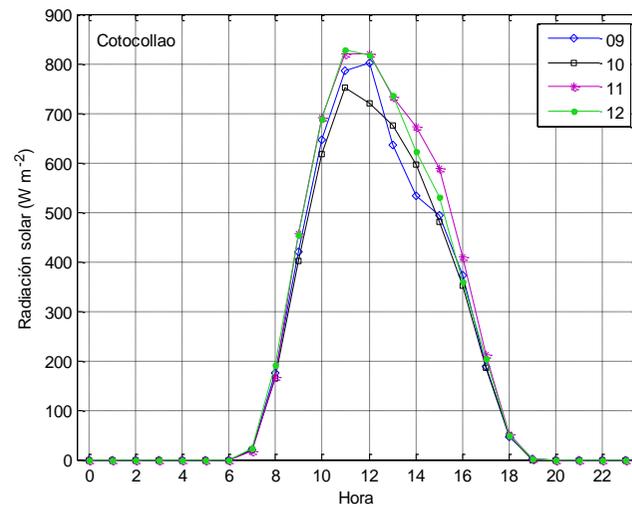
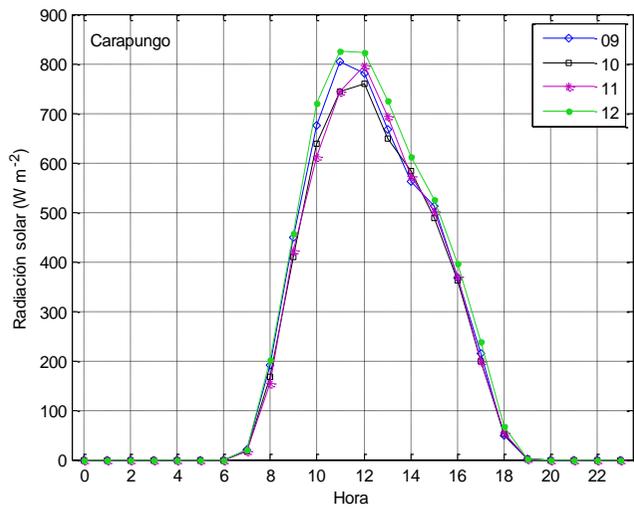


Figura 12. Perfiles diarios anuales de medianas horarias de radiación solar, en las estaciones analizadas, entre los años 2009 y 2012, superpuestas anualmente.

4.1.3. Temperatura

La Figura 13 presenta perfiles diarios de temperatura correspondientes al año 2012, representativos de los demás años analizados; la Figura 14 muestra los perfiles de medianas horarias generales para cada estación, mientras que la Figura 15 exhibe los perfiles de medianas horarias anuales de cada estación. La tendencia general está relacionada con la dinámica observada para la radiación solar, con temperaturas que descienden lenta y casi linealmente durante horas de la noche y madrugada, alcanzando un punto mínimo a las 06h00 horas; desde las 07h00, hora a la que se registró la salida del sol en la sección correspondiente, la temperatura aumenta de forma rápida, hasta presentar un máximo entre las 12h00 y 14h00 horas, y descender nuevamente, de forma rápida primero, hasta aproximadamente las 20h00 horas, luego de lo cual el descenso se vuelve lento.

La Figura 13 permite observar la existencia de una menor dispersión de los datos en comparación con otras variables meteorológicas, lo cual está relacionado con la relativamente poca variación en temperaturas que se da en la ciudad de Quito por su localización geográfica, que evita que tenga estaciones muy marcadas. La dispersión también se muestra similar en todas las estaciones.

En Carapungo se presentan las temperaturas más elevadas, especialmente en horas de la mañana y tarde, tal como se observa en la Figura 14, si bien la diferencia es pequeña. Las estaciones restantes aparecen con temperaturas muy similares entre sí, consecuencia de la escasa variación en la radiación solar observada previamente. De forma similar, la variación anual observada en la Figura 15 es distinta en Carapungo, siendo más elevada que en el resto de estaciones, que mantienen mayor regularidad.

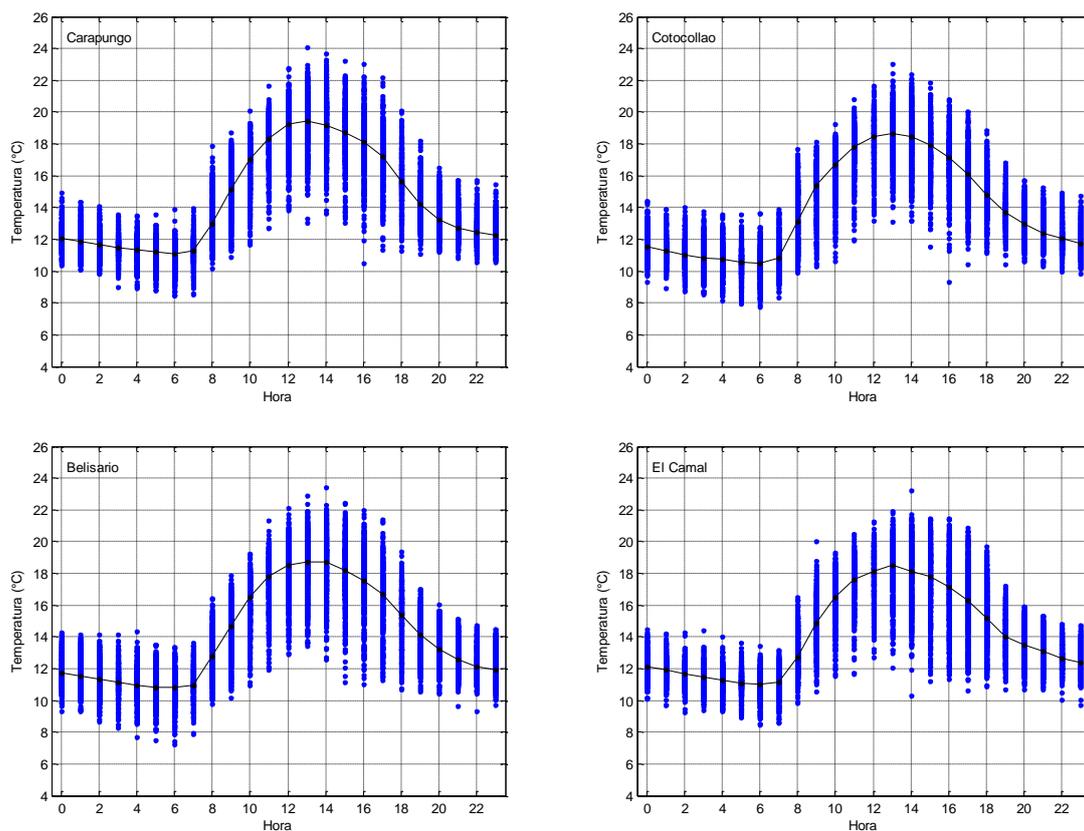


Figura 13. Perfiles diarios de temperatura correspondientes al año 2012, en las estaciones analizadas. Los puntos azules corresponden a los datos horarios y la línea negra a la mediana horaria de dichos datos.

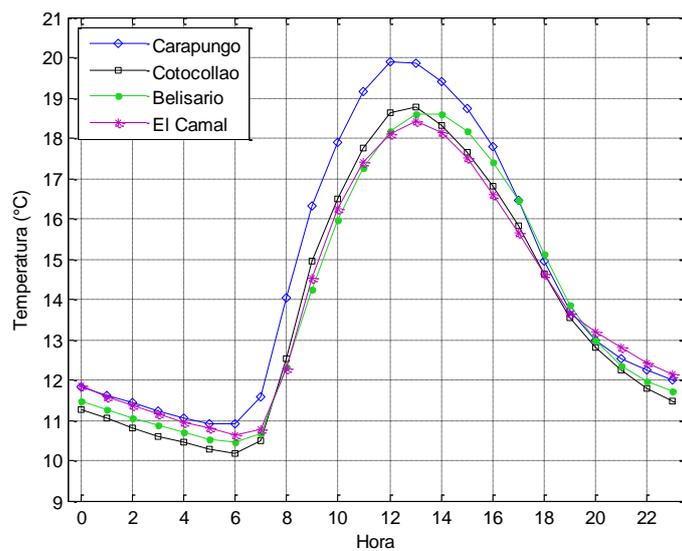


Figura 14. Perfiles diarios de medianas horarias de temperatura, realizados con el juego completo de datos para los años analizados (2009-2012).

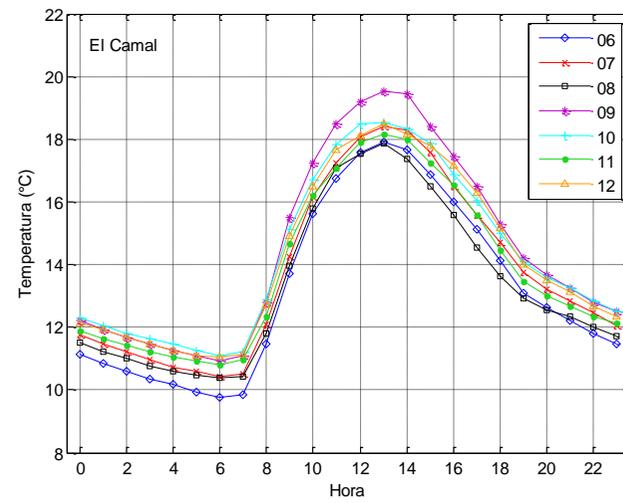
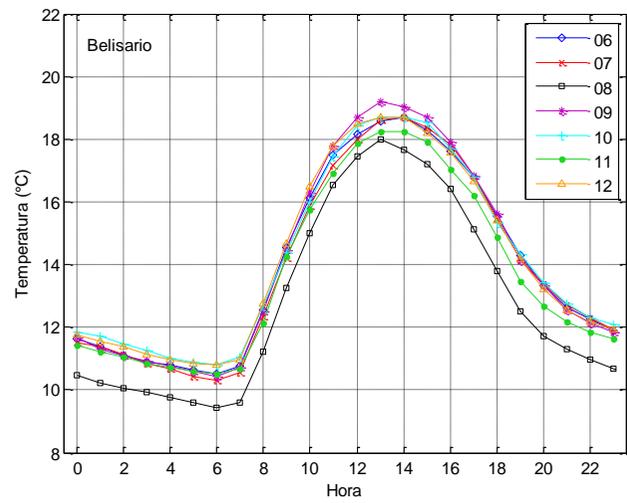
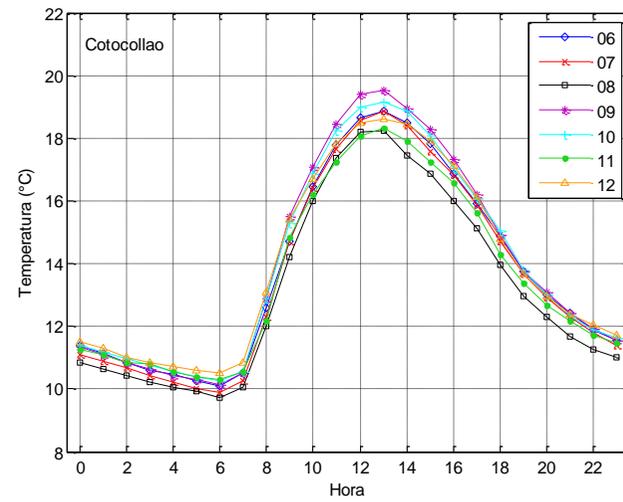
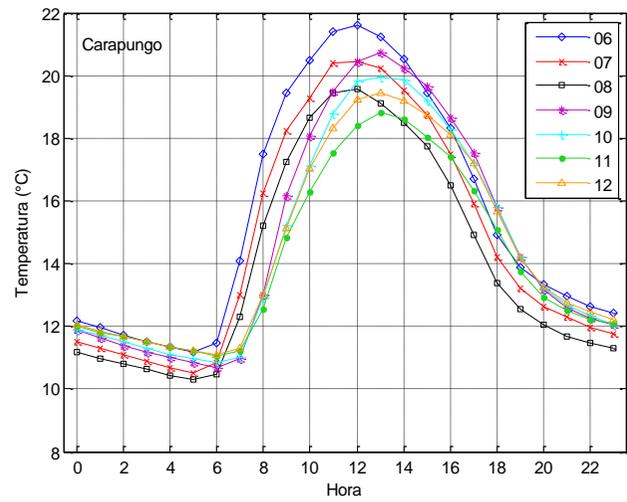


Figura 15. Perfiles diarios anuales de medianas horarias de temperatura, en las estaciones analizadas, entre los años 2006 y 2012, superpuestas anualmente.

4.1.4. Precipitación

La precipitación en el DMQ, a diferencia de resto de variables meteorológicas analizadas, se presenta en periodos específicos y cortos de tiempo, generando una cantidad mayoritaria de registros iguales a cero, es decir que la mayor parte del tiempo no existe precipitación en la ciudad de Quito; esto obliga a hacer una distinción en la forma de tratar los datos de precipitación para la realización de los análisis pertinentes.

En la Figura 16 se han incluido los perfiles diurnos de precipitación correspondientes al año 2008, representativos del resto de años analizados; en estos perfiles se ha excluido las medianas horarias, ya que, al ser la mayor parte de registros iguales a cero, como se explicó previamente, las medianas calculadas usando la totalidad de los datos son también iguales a cero. Sin embargo, para poder observar las dinámicas típicas en cada estación, se calcularon medianas utilizando solamente los datos diferentes de cero que registraron en cada estación; perfiles de medianas horarias calculadas con este método se exhiben en la Figura 17.

En ambas figuras se observa que, de una forma muy general, la precipitación es mayor en horas de la tarde, entre las 17h00 y las 20h00 horas, es baja entre las 08h00 y las 13h00 horas y moderada en el resto de horas. Las precipitaciones más altas se presentan en la estación de El Camal, seguida de Belisario; las precipitaciones en Cotocollao y Carapungo son más bajas y similares entre sí; esto coincide con la información para radiación solar, que coloca a las estaciones más lluviosas como las que menos radiación reciben, permitiendo observar que este es un efecto de la nubosidad existente. Dado que los datos no tienen una mayor resolución temporal, este efecto no puede ser mayormente analizado.

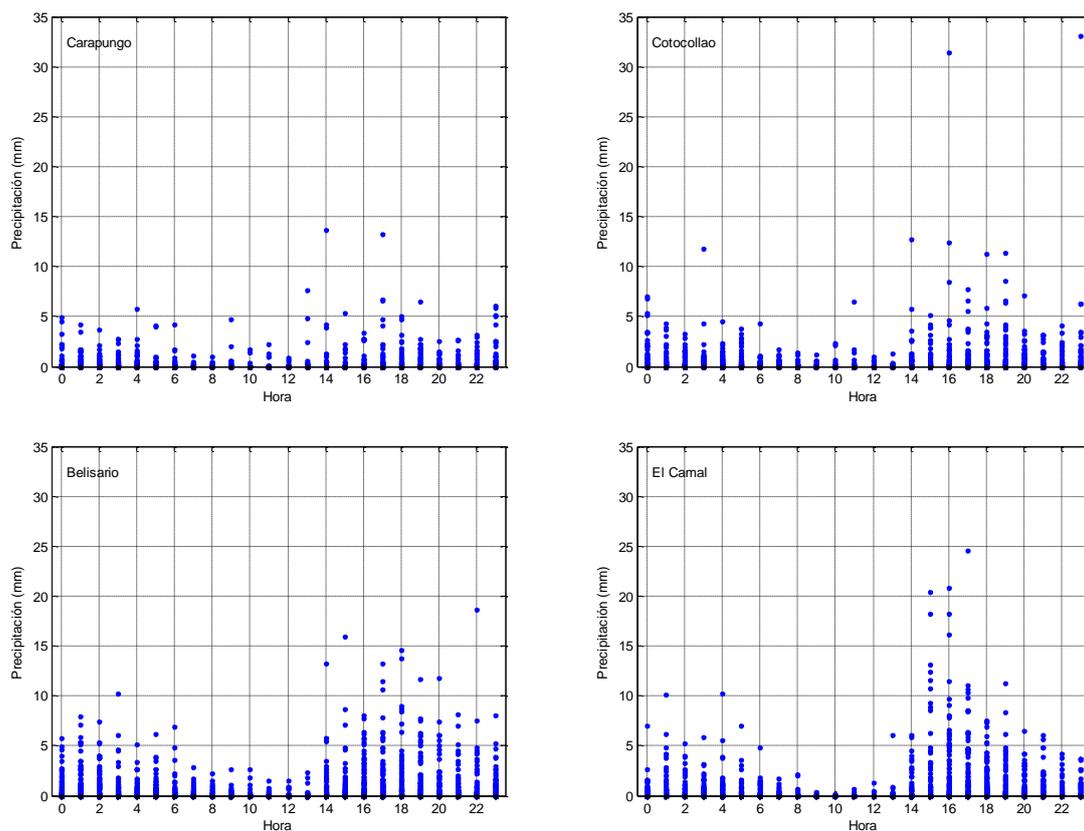


Figura 16. Perfiles diarios de precipitación correspondientes al año 2008, en las estaciones analizadas. Los puntos azules corresponden a los datos horarios.

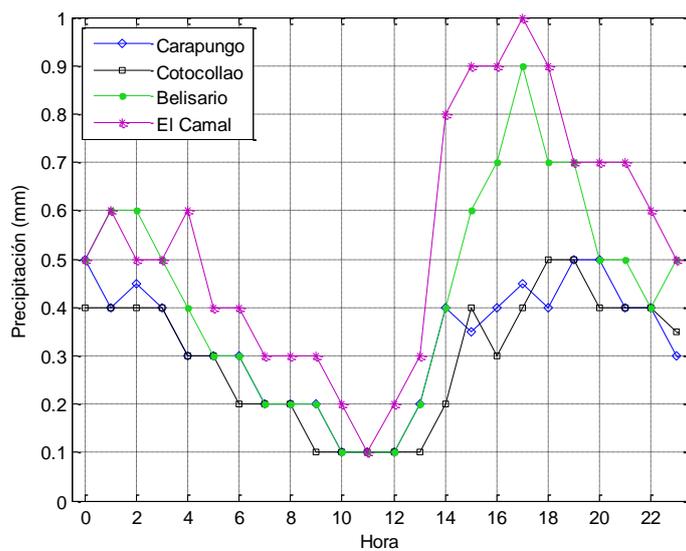


Figura 17. Perfiles diarios de medianas horarias de precipitación, realizados con los registros diferentes de cero en los años analizados (2006-2012).

4.2. Perfiles diurnos de contaminantes

Los perfiles diurnos permiten reconocer patrones típicos que se presentan en las concentraciones de contaminantes día a día. En la Figura 18 se presentan perfiles diurnos para los cuatro contaminantes analizados con datos correspondientes al año 2007, en diferentes estaciones de monitoreo; los puntos azules corresponden a los datos horarios de concentración del contaminante, mientras que la línea negra representa a la mediana de los datos de cada hora. Estas gráficas muestran una alta dispersión de datos para cada hora, a pesar de que, por la cantidad de puntos utilizados, se esperaría que los datos se encuentren compactados alrededor de cierto valor central. Perfiles para el resto de años analizados exhiben un comportamiento similar en todas las estaciones.

Este comportamiento puede atribuirse al efecto de variables meteorológicas, así como a variaciones en las emisiones, tanto semanales (distintas emisiones en días laborables y no laborables, por ejemplo) como estacionales (cambios en las condiciones meteorológicas, cambios en las emisiones en meses de verano, entre otras). Estas posibilidades son exploradas en las secciones posteriores.

En las Figuras 19, 20, 21 y 22 se grafican perfiles de medianas anuales de cada contaminante de forma superpuesta para cada estación. De manera general, se aprecia que todos los contaminantes presentan un perfil con un pico de concentraciones en horas de la mañana y algunos exhiben, además, un segundo pico en horas de la tarde o noche.

El primer pico es más pronunciado y bastante bien definido en todos los casos; exhibe concentraciones máximas a las 07h00 en El Camal para todos los contaminantes y entre las 07h00 y las 08h00 en Belisario, Cotocollao y Carapungo, dependiendo del año, excepto para NO₂ en esta última estación, en la que los valores máximos se observan a las 06h00.

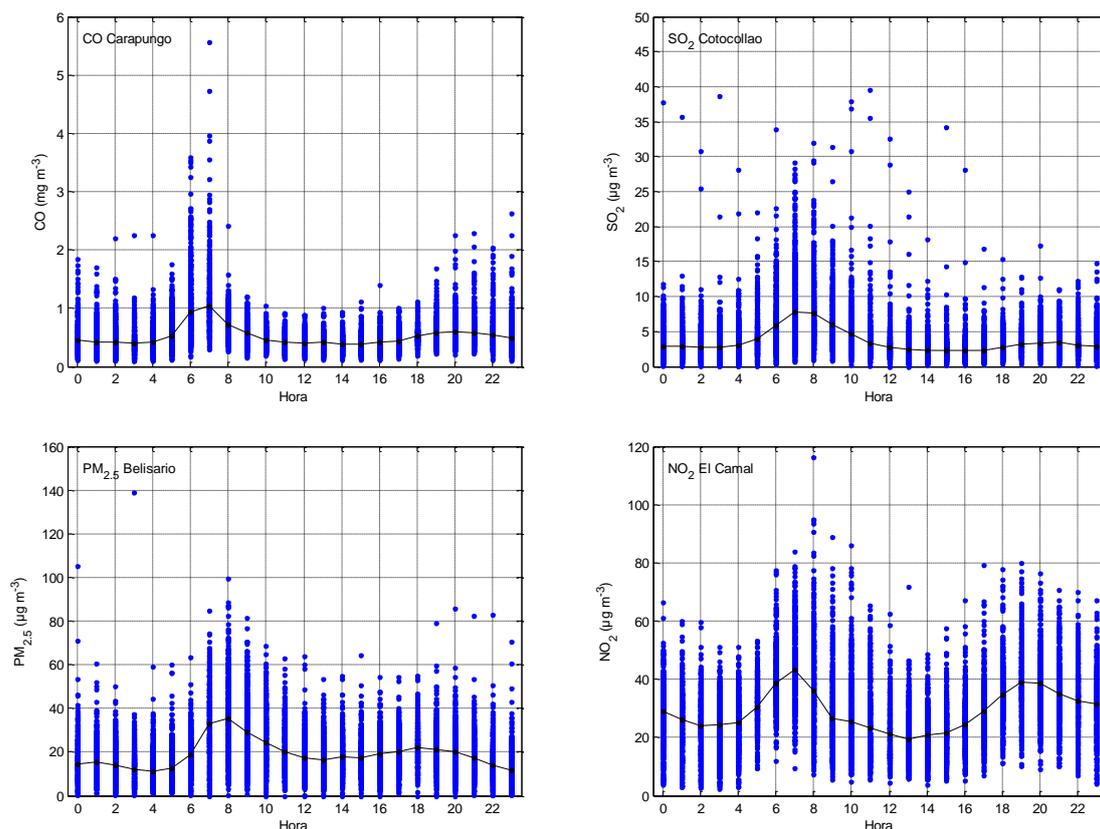


Figura 18. Variaciones diurnas de los contaminantes analizados durante el año 2007, en diferentes estaciones. Los puntos azules corresponden a los datos horarios y la línea negra a la mediana de dichos datos.

El segundo pico muestra mayor variación. En las estaciones de Cotocollao y Belisario se presenta de forma consistente para todos los contaminantes, exhibiendo valores máximos entre las 20h00 y 21h00 en la primera estación y entre las 18h00 y 19h00 en la segunda. Por otro lado, en las estaciones de Carapungo y El Camal este pico es variable y presenta máximos en distintas horas dependiendo del contaminante y en algunos casos no se observa ningún pico, lo que es especialmente visible en el caso del SO_2 . Las concentraciones bajan en horas de la madrugada, observándose valores mínimos entre las 01h00 y las 04h00 dependiendo del contaminante y estación, y también en horas de la tarde, entre las 13h00 y las 16h00.

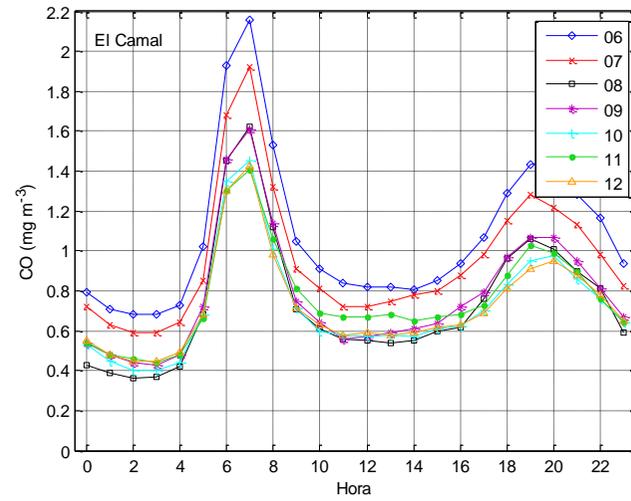
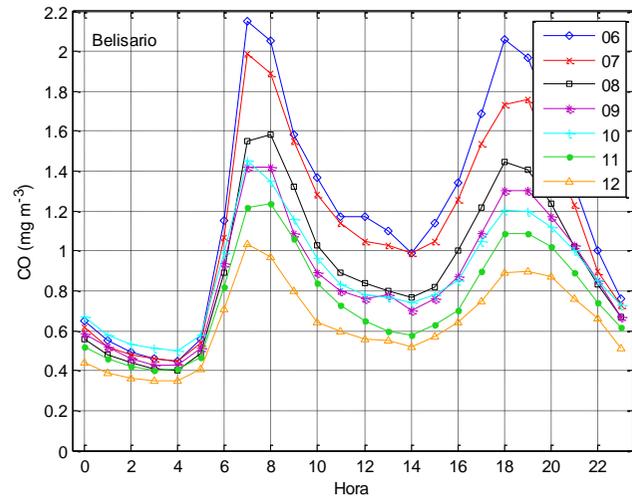
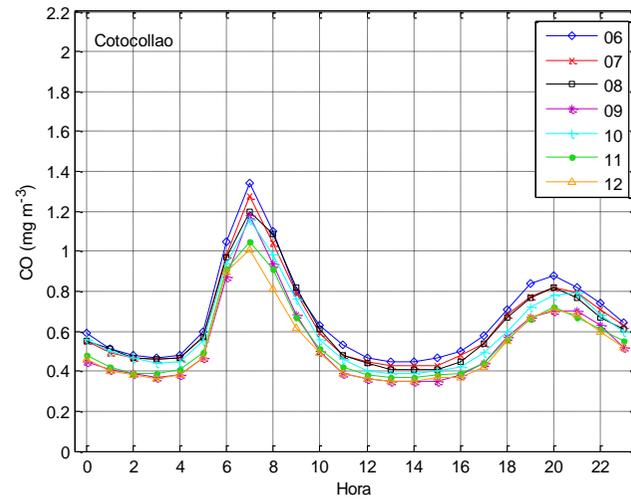
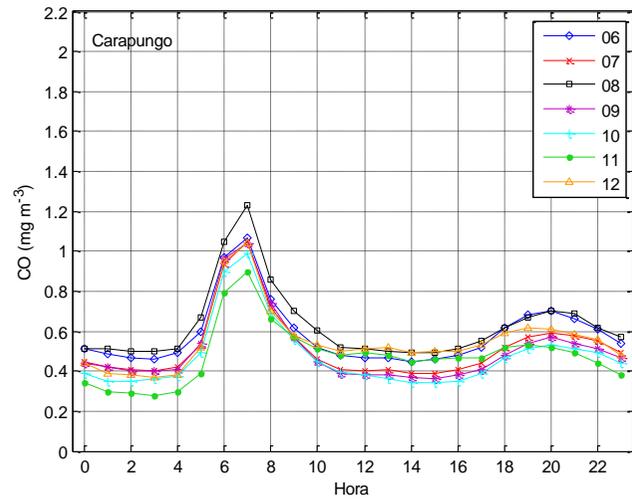


Figura 19. Variaciones diurnas de las concentración mediana anual de CO en cuatro estaciones de monitoreo atmosférico de Quito, entre los años 2006 y 2012, superpuestas anualmente.

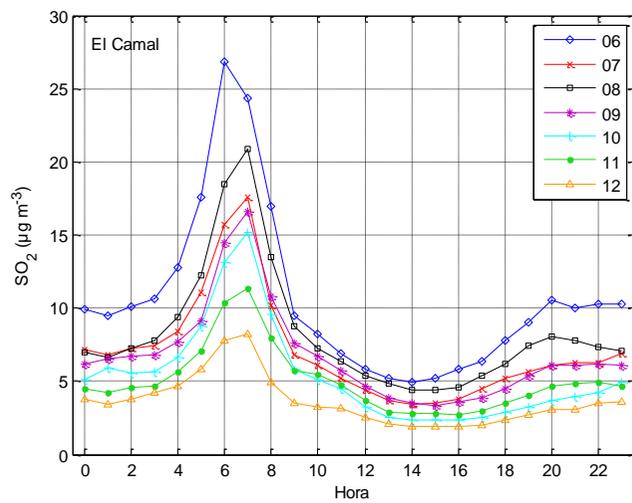
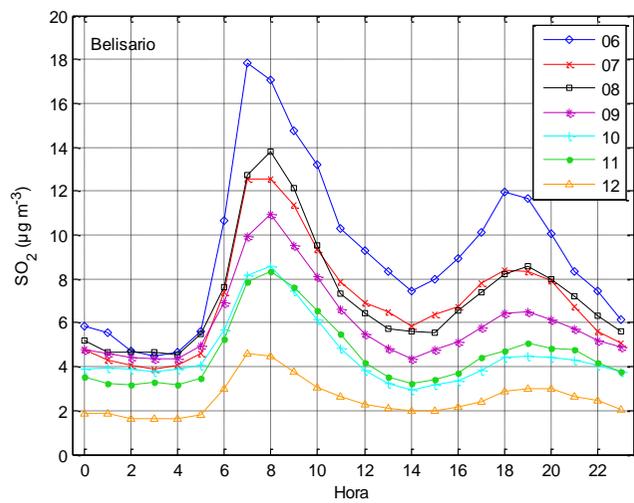
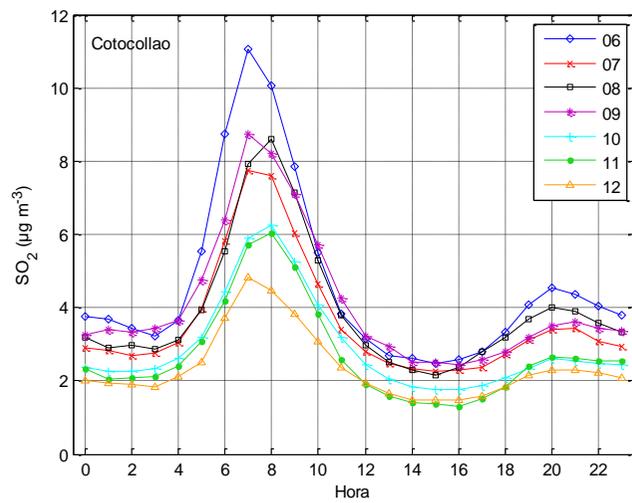
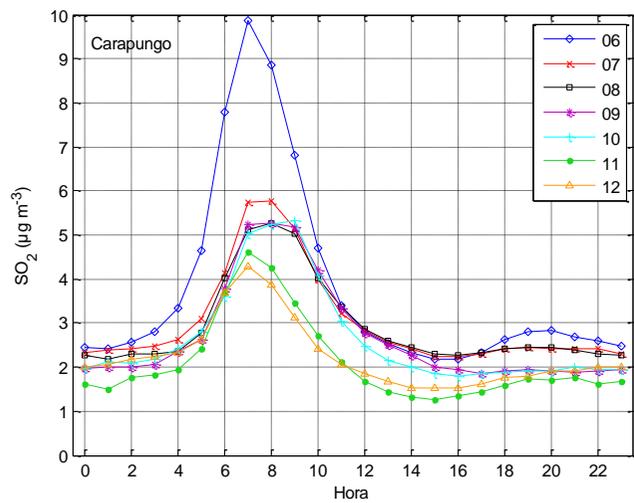


Figura 20. Variaciones diurnas de las concentración mediana anual de SO₂ en cuatro estaciones de monitoreo atmosférico de Quito, entre los años 2006 y 2012, superpuestas anualmente.

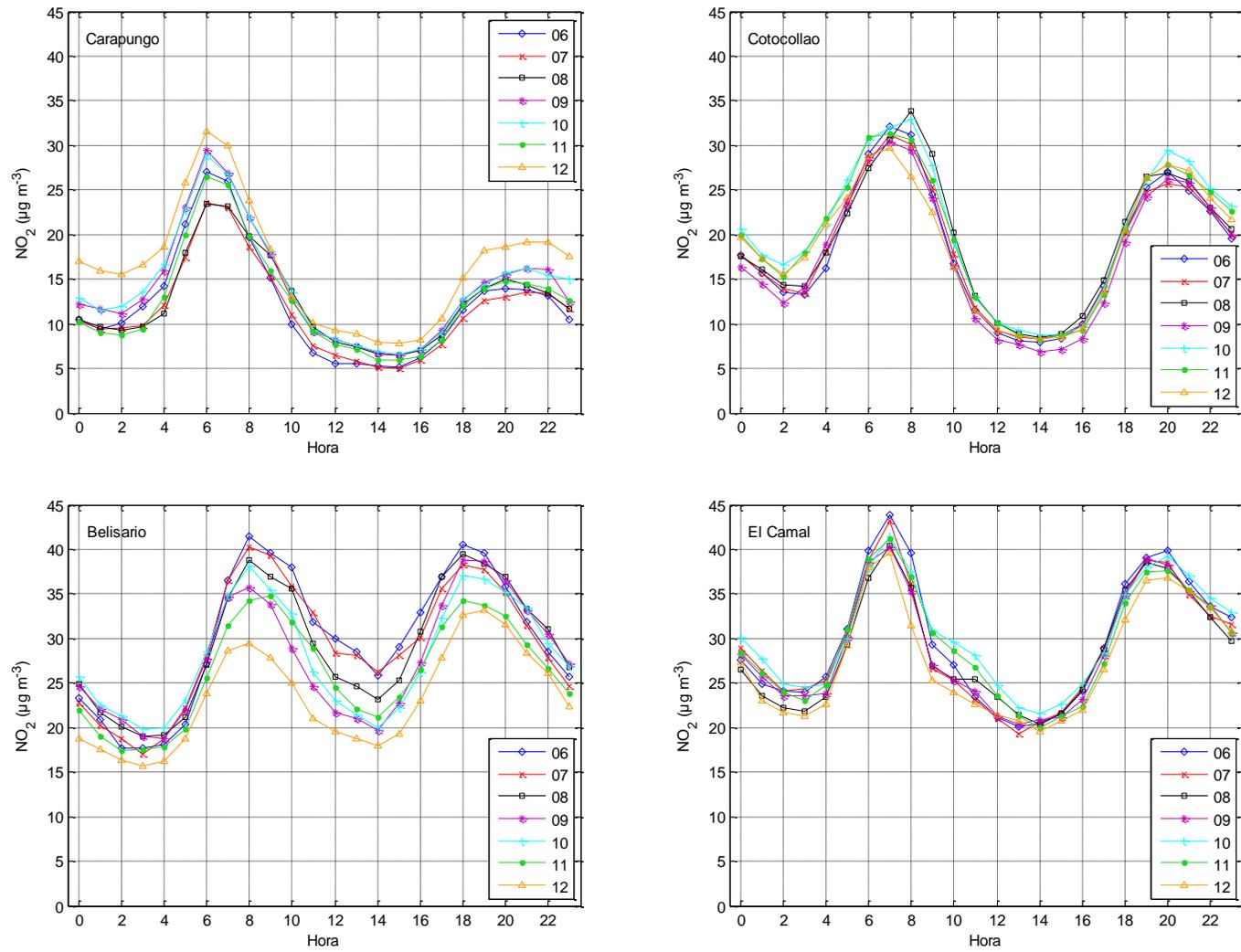


Figura 21. Variaciones diurnas de las concentración mediana anual de NO₂ en cuatro estaciones de monitoreo atmosférico de Quito, entre los años 2006 y 2012, superpuestas anualmente.

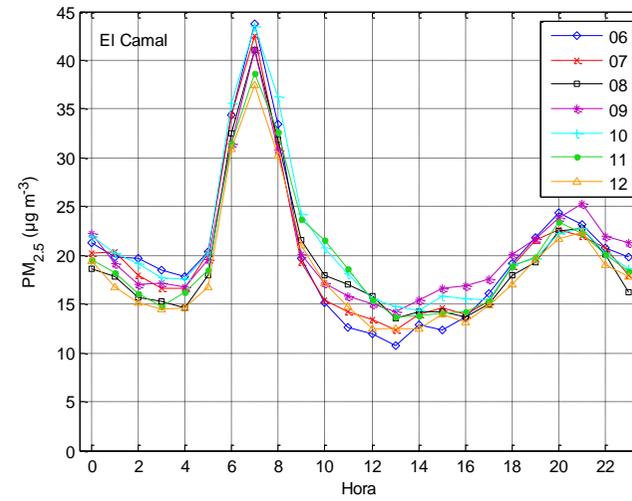
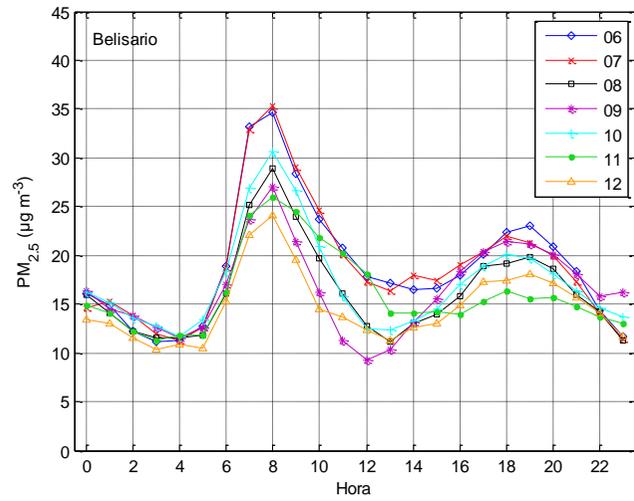
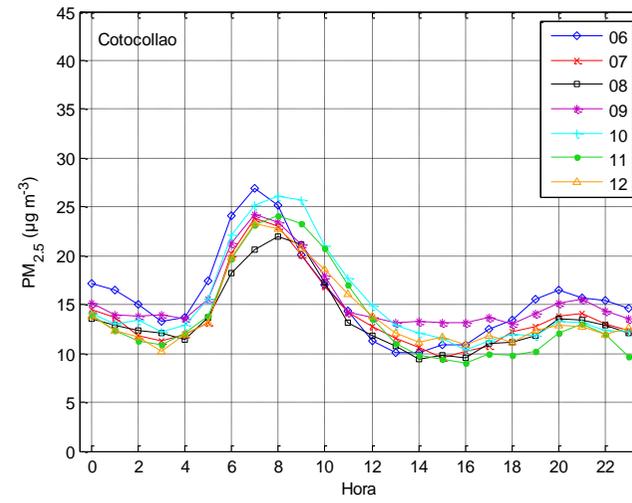
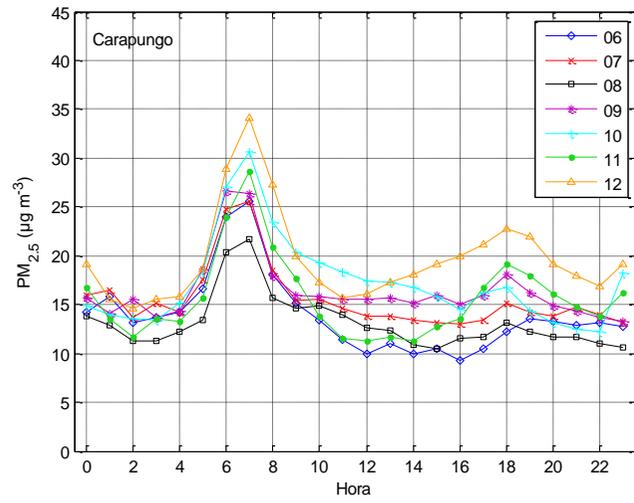


Figura 22. Variaciones diurnas de las concentración mediana anual de PM_{2.5} en cuatro estaciones de monitoreo atmosférico de Quito, entre los años 2006 y 2012, superpuestas anualmente.

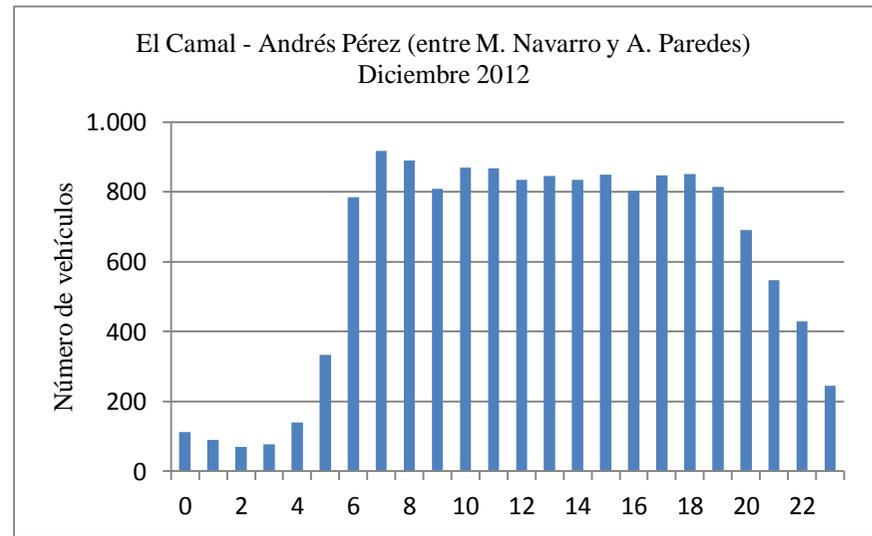
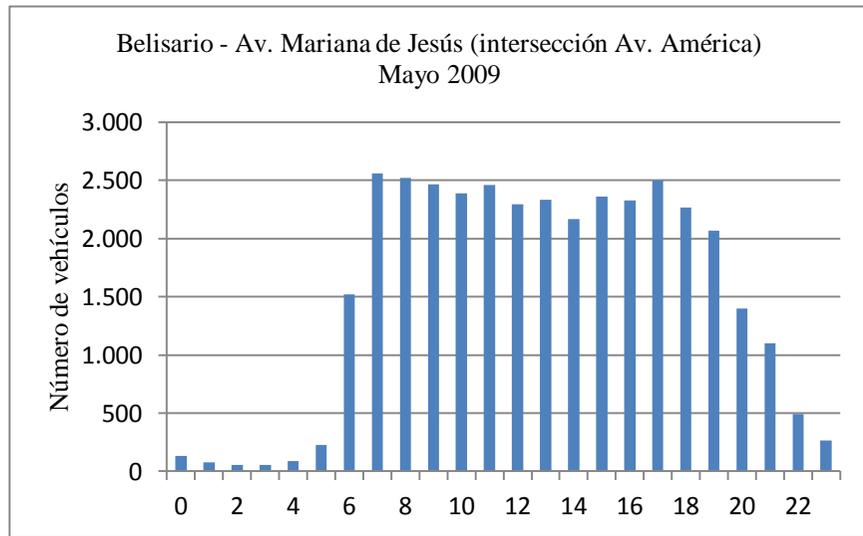
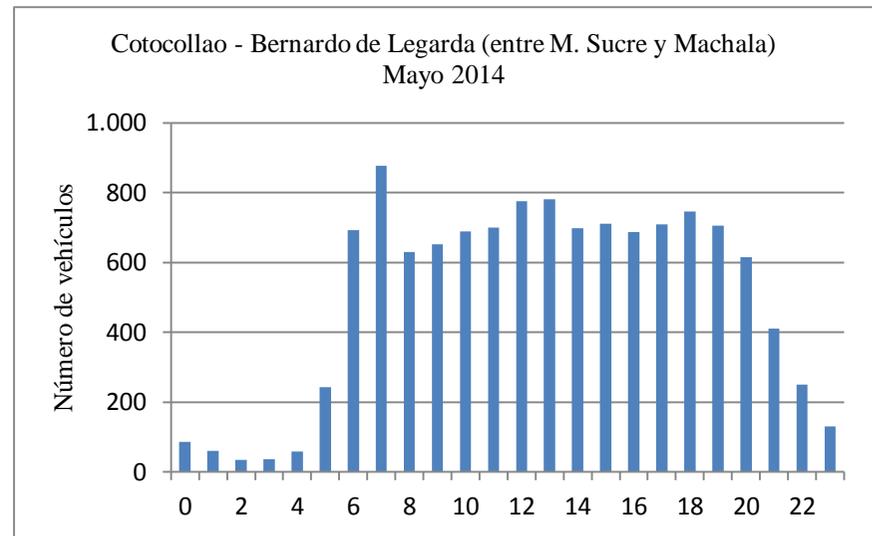
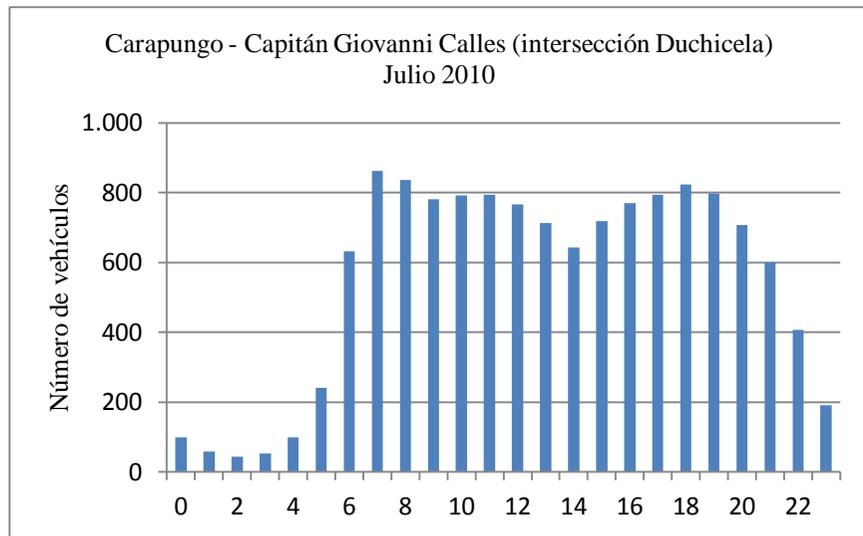


Figura 23. Perfiles diurnos de flujo vehicular en zonas cercanas a las estaciones de monitoreo, como promedio de días laborables.

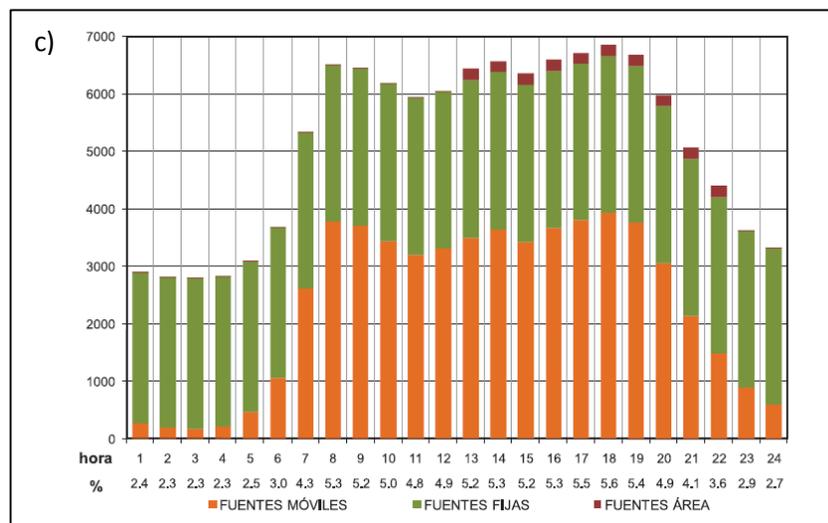
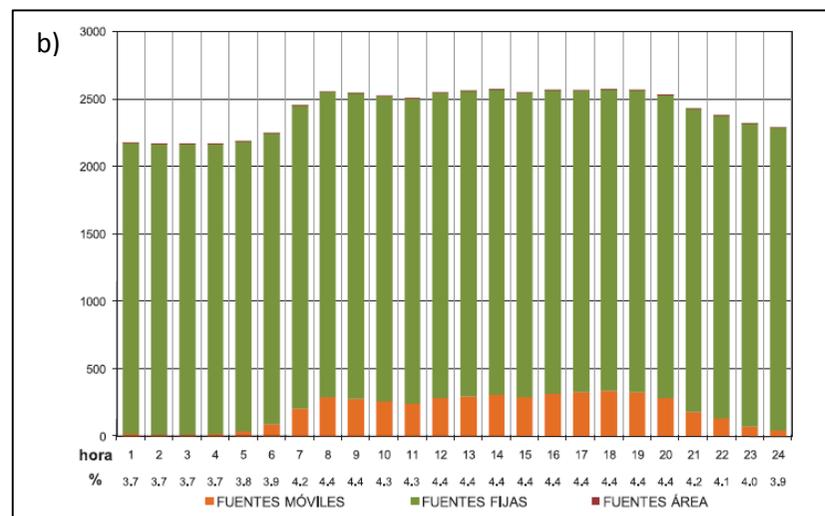
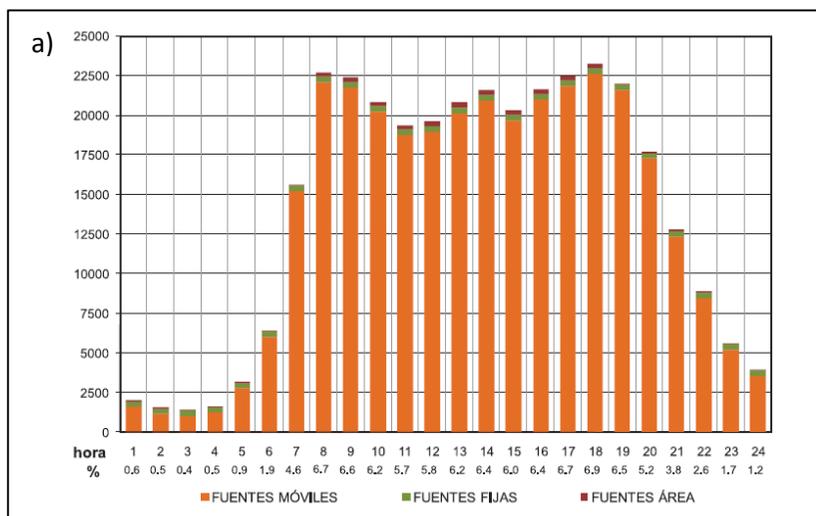


Figura 24. Perfiles de emisiones horarias de a) CO, b) SO₂, c) NO_x, en kg de contaminante por hora, durante días laborables. Fuente: Inventario de emisiones 2007.

Comúnmente, se tiende a relacionar de forma directa a las emisiones de un contaminante con su concentración en un sitio determinado. El CO, por ejemplo, es emitido en su mayor parte por automóviles (responsables por el 96.9% del total de emisiones, ver Tabla 2), por lo que se esperaría observar concentraciones altas durante las horas de elevado tráfico vehicular, con máximos de concentración en horas pico.

La Figura 23 muestra perfiles diurnos de flujo vehicular en calles cercanas a las estaciones de monitoreo, de acuerdo a mediciones realizadas en meses y años específicos por la Secretaría de Movilidad del DMQ, mientras que la Figura 24a exhibe un perfil de emisiones horarias de CO durante un día laborable, generado por el Inventario de Emisiones de 2007 de la Secretaría de Ambiente; del cotejamiento de estos datos y los perfiles elaborados para concentración de CO en la sección anterior, se advierte que el pico de concentración generado a las 07h00 es consistente con el aumento de tráfico vehicular a dicha hora en todas las estaciones; sin embargo, los picos presentados en horas de la tarde, especialmente en las estaciones de Cotocollao y El Camal, así como las concentraciones existentes entre los dos picos (es decir, entre las 07h00 y las 20h00 horas) en todas las estaciones, no guardan relación con la cantidad de autos que circularon por las vías cercanas ni con las emisiones generales. Situaciones similares se presentan para el resto de contaminantes analizados.

Estos resultados no son extraños, ya que como se mencionó previamente (ver marco teórico), las concentraciones finales de los contaminantes no están determinadas únicamente por los niveles de emisión, sino también por la variación de las condiciones meteorológicas.

4.3. Influencia de variables meteorológicas en concentración de contaminantes

4.3.1. Velocidad de viento y temperatura

Se observó una variación conjunta de la temperatura y la velocidad de viento; esto ocurre tanto por la función de la temperatura en la determinación de la altura de la capa de mezcla, que mientras más alta se encuentre mayor movimiento del aire permite, como por el papel directo de la temperatura en la generación de los vientos (ver marco teórico). La relación observada, sin embargo, no es lineal, ya que existen factores adicionales que influyen en la velocidad del viento.

Se encontró, asimismo, una relación entre estas dos variables y las concentraciones de la mayoría de contaminantes analizados. En las Figuras 25 y 26 se presentan diagramas de dispersión con tres ejes para los cuatro contaminantes, en diferentes estaciones, representativos de las dinámicas observadas; la totalidad de los gráficos se presenta en el Anexo A.

A las 06h00 horas, las concentraciones de CO, SO₂ y NO₂ exhiben una amplia dispersión, con concentraciones tanto altas como bajas, que se agrupan, en su mayoría, a temperaturas y velocidades de viento bajas; a las 14h00 horas se genera el efecto contrario, con concentraciones bajas y poco dispersas, a temperaturas y velocidades de viento medias y altas, estas últimas más dispersas que en horas de la mañana (ver Anexo B).

A pesar de que las emisiones a las 14h00 horas son iguales o mayores que las existentes a las 06h00 (ver Figuras 23 y 24), las concentraciones finales son más altas en la mañana por las bajas temperaturas, que provocan el descenso de la altura de la capa de mezcla y generan, además, vientos con velocidades bajas que no transportan los contaminantes de forma eficiente. Estos resultados están en consonancia con lo predicho por fuentes como

Ahrens (2009). Sin embargo, se observa que los puntos que aparecen a velocidades altas a las 06h00 presentan concentraciones muy bajas; esto indica que la velocidad del viento puede influir en las concentraciones aun con temperaturas (y, por lo tanto, alturas de capa límite) bajas.

En horas de la tarde, con el calentamiento de la superficie por radiación solar y el consiguiente aumento en la temperatura, la capa de mezcla es más alta, permitiendo la mezcla vertical, y los vientos son más fuertes, lo que favorece dicha mezcla así como el transporte horizontal y, consecuentemente, la mayor dispersión de los contaminantes, reduciendo las concentraciones significativamente, aun con altas emisiones.

Estas dinámicas se presentan en las estaciones de Carapungo, Cotocollao y El Camal, mientras que en Belisario se observan dinámicas distorsionadas, que no pueden ser explicadas mediante la metodología empleada en este trabajo, así como por la falta de datos más precisos sobre las emisiones de los contaminantes en lugares específicos cercanos a la estación.

Los datos de CO y SO₂ a las 20h00 horas representan un punto intermedio entre los anteriormente descritos, tanto en concentración de contaminantes como en temperatura y velocidad de viento; esto se debe a que en horas de la noche, la rapidez con la que el suelo se enfría genera distintas dinámicas de temperatura, altitud de la capa de mezcla y velocidad de viento, que controlan conjuntamente la dispersión de los contaminantes. En el caso de NO₂ se observa una variación en las condiciones meteorológicas pero no en las concentraciones, fenómeno que puede estar relacionado a la dinámica de emisión y formación de este contaminante.

El $PM_{2.5}$ exhibe una dinámica distinta, ya que las concentraciones a las 14h00 horas son similares a las observadas a las 06h00 en incluso más altas en algunas estaciones. Este resultado puede deberse a la naturaleza del contaminante, tanto por el posible efecto del viento en la suspensión de partículas finas, como por un aumento en la generación de $PM_{2.5}$ secundario causado por aumento en la temperatura.

Las relaciones observadas en la Figura 26 son un tanto distintas a lo descrito previamente. A las 08h00 se observan concentraciones con una alta dispersión, que incluyen tanto niveles bajos como altos, estos últimos relacionados a las velocidades bajas de viento que se presentan a esta hora; a las 18h00 las concentraciones se mantienen en niveles medios y bajos, a velocidades de viento superiores a los exhibidos a las 08h00 horas.

Al existir radiación solar en ambas horas analizadas, las temperaturas no presentan diferencias apreciables; esto implica que, en ambos casos, la capa de mezcla tiene una altura suficiente como para permitir una adecuada dispersión vertical de los contaminantes. En este escenario, se observa que la velocidad de viento es el factor más influyente, ya que velocidades mayores a las 18h00 generan la desaparición de las concentraciones altas que se observan a las 08h00, a pesar de esperar emisiones similares a ambas horas. En este caso, esta dinámica es similar en todas las estaciones y en todos los contaminantes.

Además de las variaciones diurnas, variaciones de temperatura y velocidad de viento en una misma hora pueden influir en la concentración de CO, como se observa en las Figuras 27, 28, 29 y 30. A diferencia de los patrones diurnos, en los gráficos horarios se observa que las dos variables meteorológicas pueden presentar variación conjunta o no, independientemente de la hora del día.

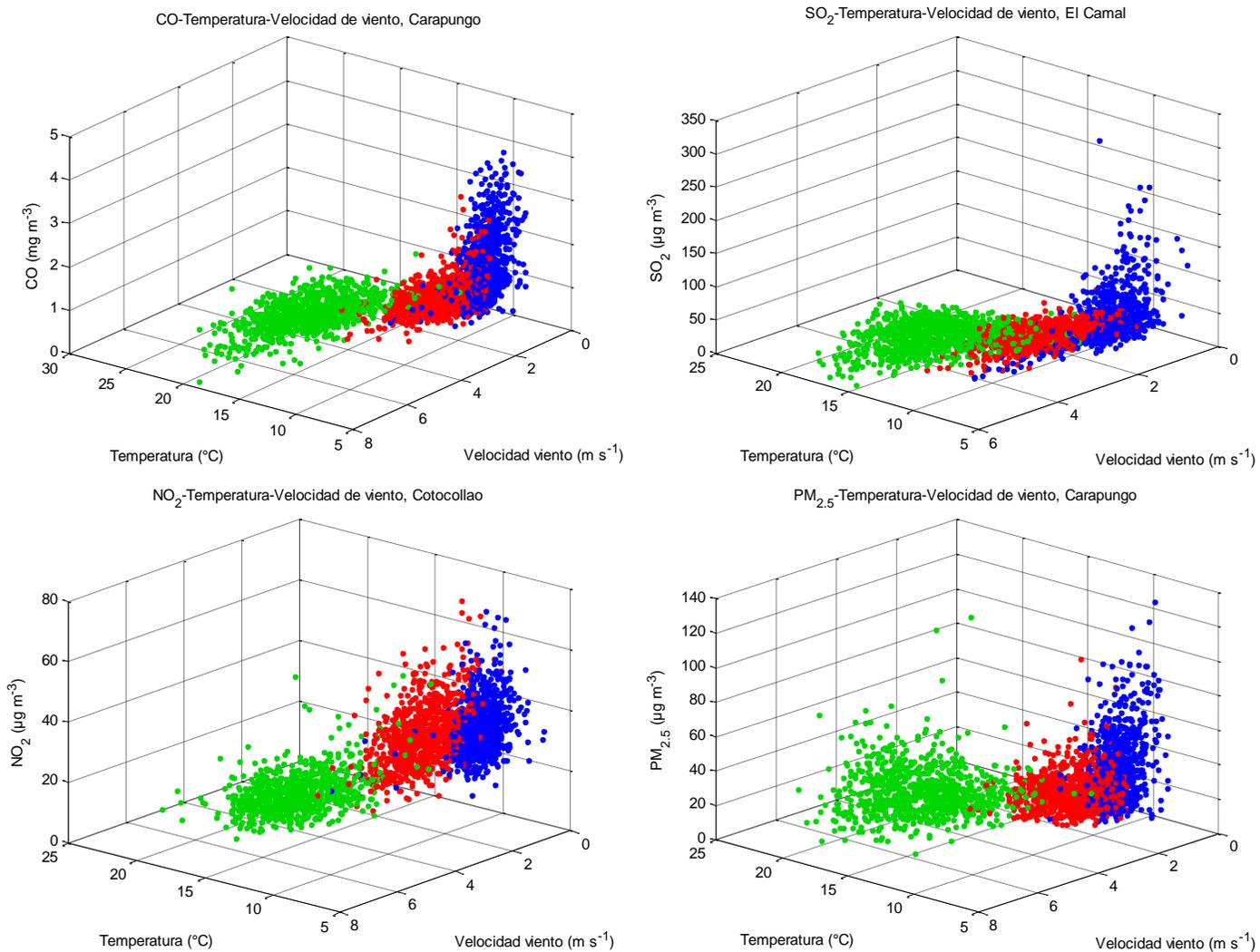


Figura 25. Diagramas de dispersión para concentraciones de contaminantes, velocidad de viento y temperatura, en diferentes estaciones. Los puntos en azul corresponden a las 06h00 horas, los puntos en verde a las 14h00 horas, y los puntos en rojo a las 20h00 horas.

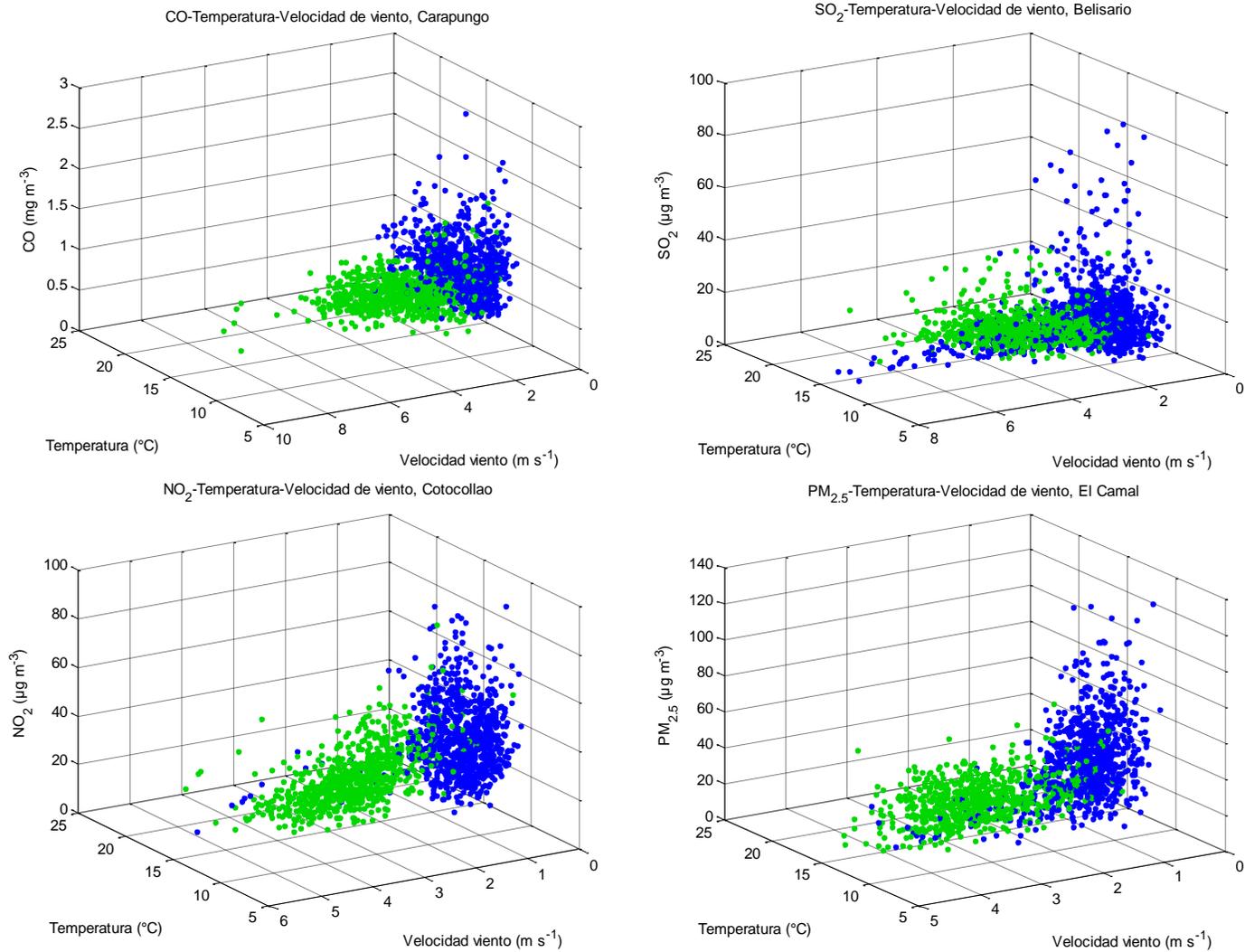


Figura 26. Diagramas de dispersión para concentraciones de contaminantes, velocidad de viento y temperatura, en diferentes estaciones. Los puntos en azul corresponden a las 08h00 horas y los puntos en verde a las 18h00 horas.

En el caso de CO y SO₂, ambos contaminantes primarios, velocidades de viento altas producen concentraciones bajas incluso a temperaturas bajas, es decir, con capas de mezcla de poca altura; además, la elevación de la temperatura también puede producir concentraciones de contaminantes bajas a velocidades de viento pequeñas; sin embargo, las concentraciones más bajas se producen cuando ambas variables son altas al mismo tiempo.

En el caso de NO₂ y PM_{2.5}, se observa una predominancia de la temperatura en la determinación de las concentraciones finales, ya que la velocidad de viento no genera reducciones tan efectivas como con los otros dos contaminantes. Este efecto se relaciona con la naturaleza parcialmente secundaria de ambos contaminantes; en el caso de NO₂, temperaturas mayores estimulan las reacciones de destrucción del contaminante (Vanos, y otros, 2013); en relación al PM_{2.5}, este resultado se contradice con el obtenido en los gráficos anteriores, lo que implica que la temperatura no es la causa del aumento de concentraciones de este contaminante en la hora 14h00.

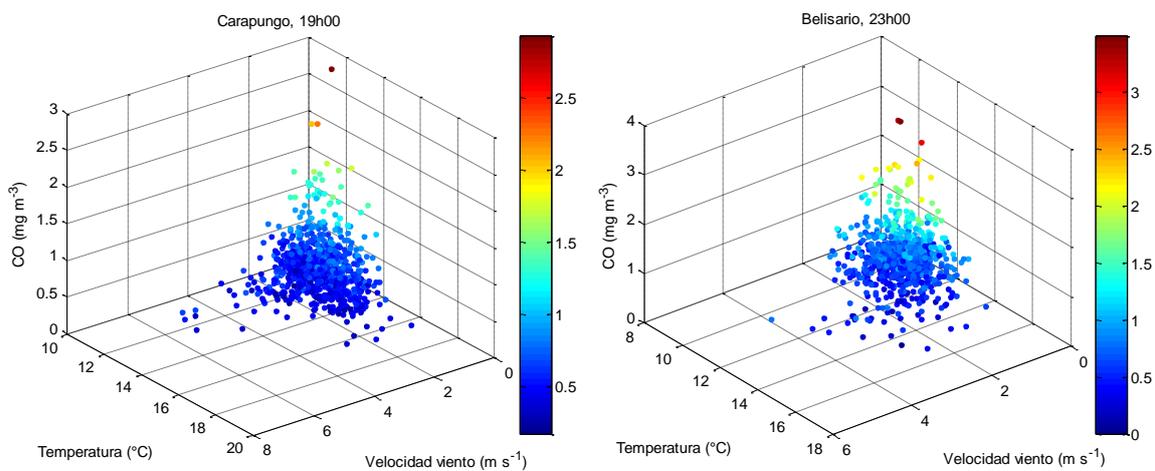


Figura 27. Diagramas de dispersión para concentración de CO, temperatura y velocidad de viento, en horas específicas.

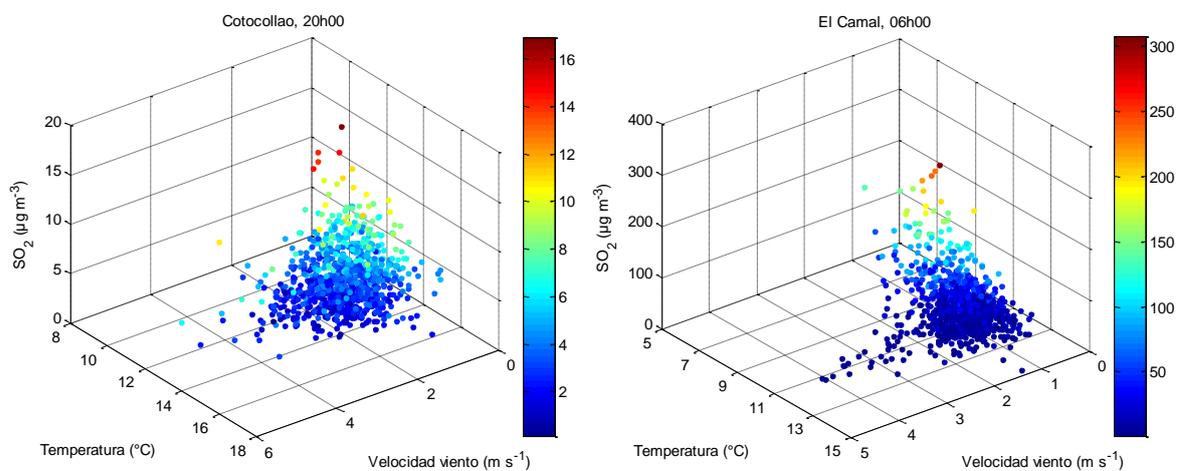


Figura 28. Diagramas de dispersión para concentración de SO₂, temperatura y velocidad de viento, en horas específicas.

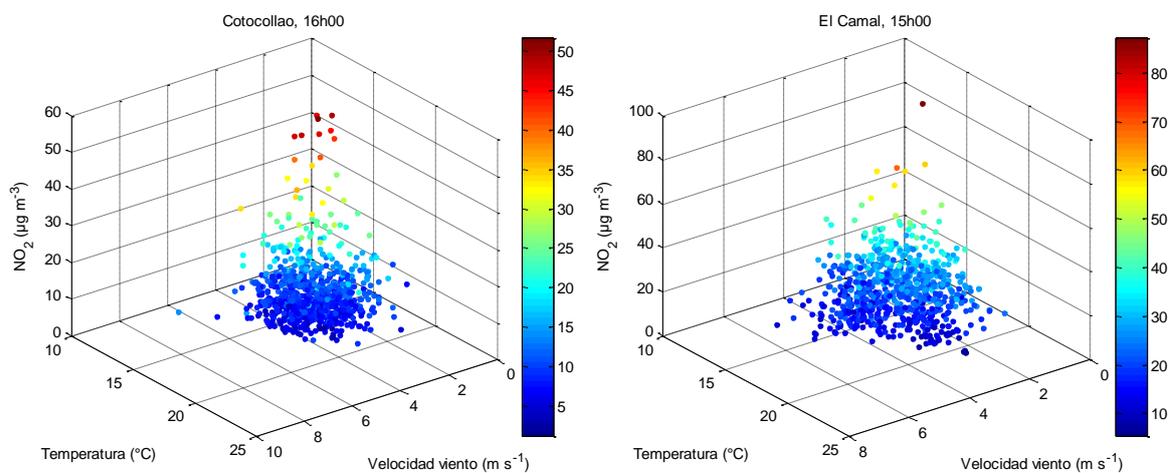


Figura 29. Diagramas de dispersión para concentración de NO₂, temperatura y velocidad de viento, en horas específicas.

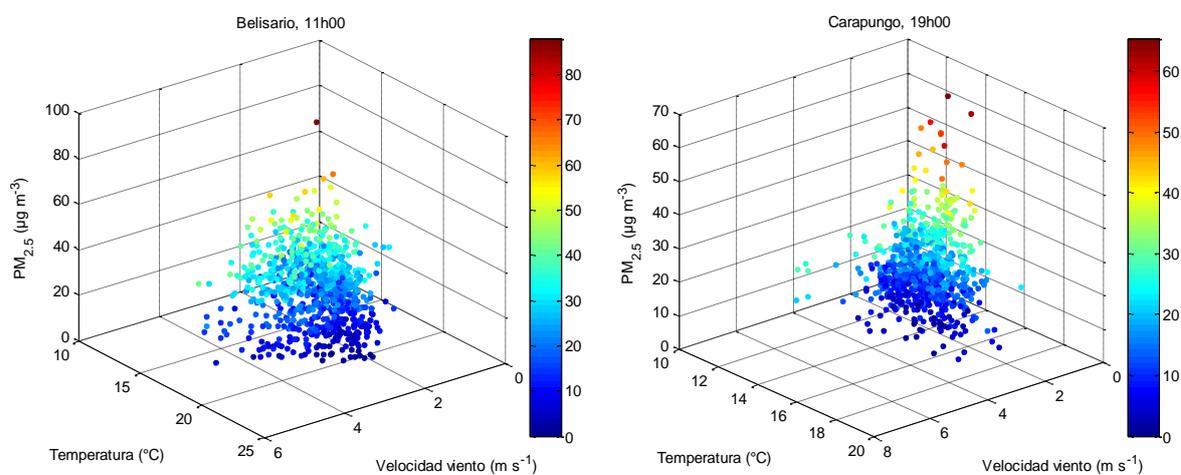


Figura 30. Diagramas de dispersión para concentración de PM_{2.5}, temperatura y velocidad de viento, en horas específicas.

4.3.2. Radiación solar

La radiación solar muestra influencia en las concentraciones de NO_2 exclusivamente, ya que la radiación solar actúa como catalizador de la reacción de conversión de NO_2 en O_3 , generando, por lo tanto, una reducción en las concentraciones.

Lo descrito se observa en la Figura 31; en las estaciones de Carapungo, Cotocollao y El Camal, se observan concentraciones altas a las 08h00 horas, bajas a las 14h00 y medias a las 18h00. Como se visualiza más fácilmente en la Figura 32a, a las 14h00 y a las 18h00 horas se presentan velocidades de viento similares, a pesar de lo cual existe una diferencia en las concentraciones observadas a estas dos horas; sin embargo, en la Figura 32b se observa que las concentraciones más elevadas de las 18h00 se generan a valores de radiación solar más bajos, mientras que las concentraciones menores de las 14h00 ocurren a valores de radiación solar altos, evidenciando la influencia de la radiación solar sobre las concentraciones de NO_2 que se mencionó previamente.

La Figura 33 muestra gráficos de dispersión con tres ejes, para radiación solar, temperatura y velocidad de viento, y además muestra las concentraciones de NO_2 según la escala de color; los gráficos son para horas específicas, por lo que permiten observar la variación de las concentraciones en una misma hora, es decir, cuando se espera que existan emisiones similares. Se observa que, en general, las concentraciones altas del contaminante (los puntos de color más cercano al rojo) se hallan localizadas a valores bajos de radiación solar y velocidad de viento, mientras que los puntos que se hallan a valores de radiación altos corresponden a concentraciones menores de NO_2 .

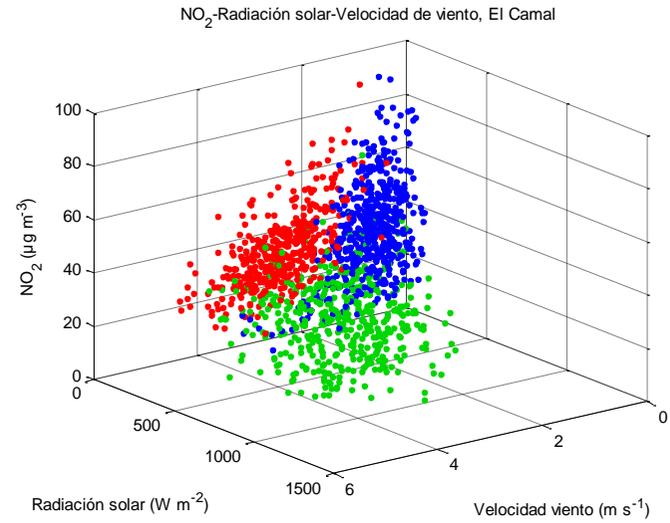
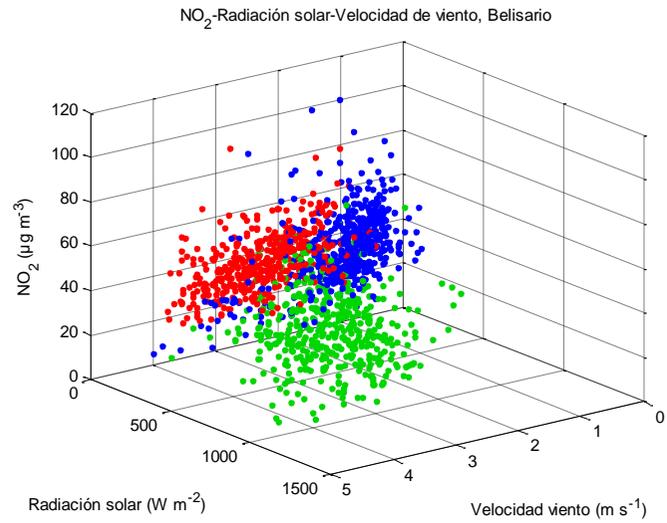
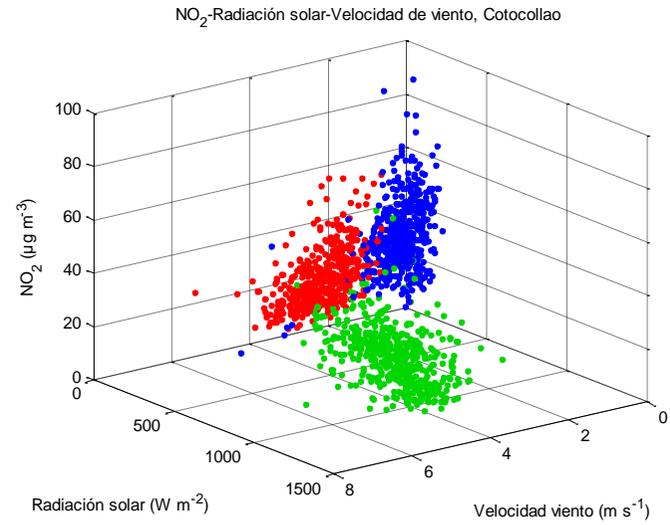
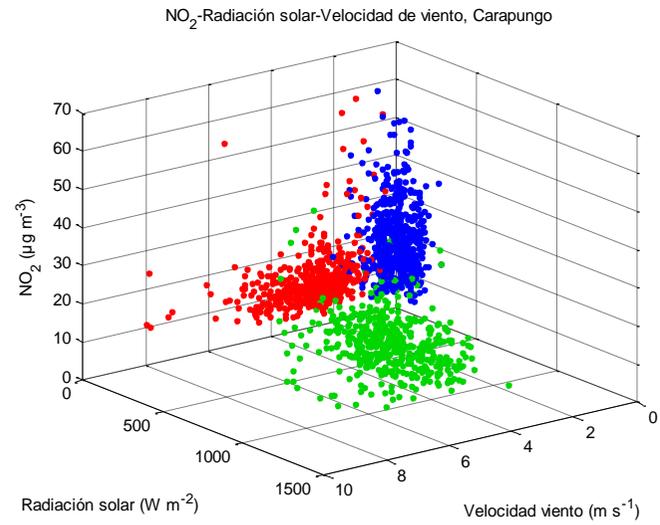


Figura 31. Diagramas de dispersión para concentraciones de NO₂, velocidad de viento y radiación solar, en diferentes estaciones. Los puntos en azul corresponden a las 08h00 horas, los puntos en verde a las 14h00 horas y los puntos en rojo a las 18h00 horas.

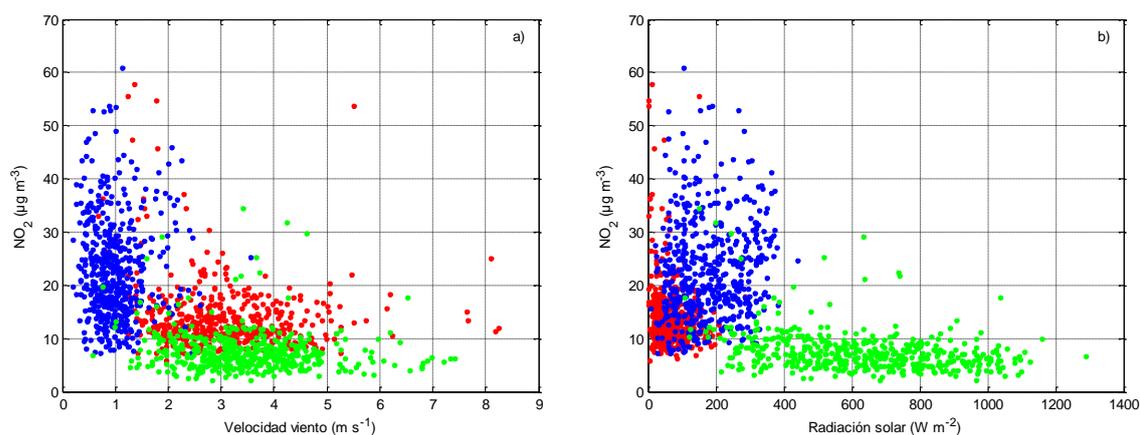


Figura 32. Diagramas de dispersión para a) concentración de NO₂ y velocidad de viento, b) concentración de NO₂ y radiación solar, en la estación de Carapungo.

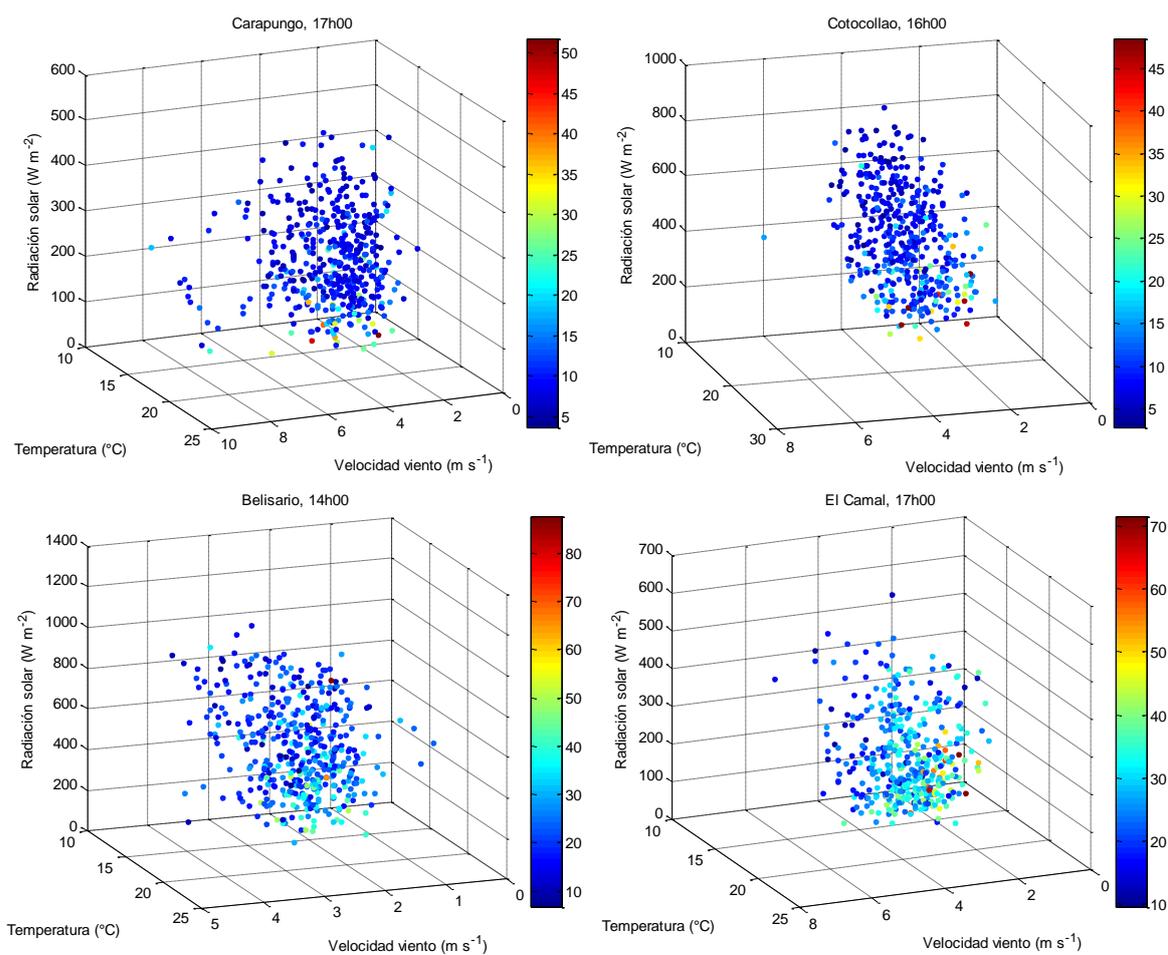


Figura 33. Diagramas de dispersión para radiación solar, temperatura y velocidad de viento, en horas específicas. La escala de color representa la concentración de NO₂, en $\mu\text{g m}^{-3}$.

En algunos casos, la radiación solar muestra ser más influyente que la velocidad de viento en las concentraciones de este contaminante. En horas de la mañana, los gráficos exhiben una distorsión en este patrón; esto puede ser generado por la naturaleza de los datos utilizados, que como se explicó previamente, corresponden a promedios horarios, que pueden sesgar los valores reales; esto último es especialmente importante con la radiación solar, ya que pueden presentarse valores bajos de radiación por la influencia de nubes que pasan sobre la zona donde se encuentra ubicado el sensor, lo cual altera el promedio final de radiación de toda una hora. Esta explicación es compatible con la distorsión de los datos en horas de la mañana, ya que, como se observó en las Figuras 16 y 17, las precipitaciones (y por tanto las nubes) son más abundantes en las horas mencionadas.

4.3.3. Precipitación

La precipitación es una variable complicada de analizar, ya que la mayor parte de los datos (89,75% en promedio) son iguales a cero, lo que dificulta observar tendencias, obtener datos estadísticos, entre otros. Se generaron gráficos de dispersión con concentraciones de contaminantes y la variable estudiada, que se presentan en las Figuras 34, 35, 36 y 37; además, se intentó generar otros tipos de gráficos que permitieran observar de mejor manera la influencia de este factor ambiental, pero no se obtuvieron resultados positivos.

Los diagramas de dispersión muestran una diferencia generada por la presencia o ausencia de precipitación; de forma general, para CO, SO₂ y PM_{2.5}, se observa que las concentraciones más elevadas se presentan cuando la precipitación es nula, mientras que al existir ciertos niveles de precipitación, las concentraciones permanecen a niveles medios y bajos, evidenciando la existencia de un efecto de reducción generado por la precipitación; este efecto se debe a la capacidad de la precipitación de transportar los contaminantes hacia el suelo, ya sea por disolución de los mismos o por su uso como núcleo de condensación (ver marco teórico).

En ciertas horas, se observa una disminución gradual de las concentraciones conforme los niveles de precipitación aumentan, mientras que en otras horas la reducción generada no parece depender del nivel de precipitación, sino solamente de su presencia o ausencia. Este efecto puede ser consecuencia de la naturaleza de los datos, ya que, al ser la precipitación un acumulado horario y las concentraciones de contaminantes un promedio horario, la influencia de la primera sobre la segunda aparece distorsionada y no refleja totalmente lo que ocurre en la realidad.

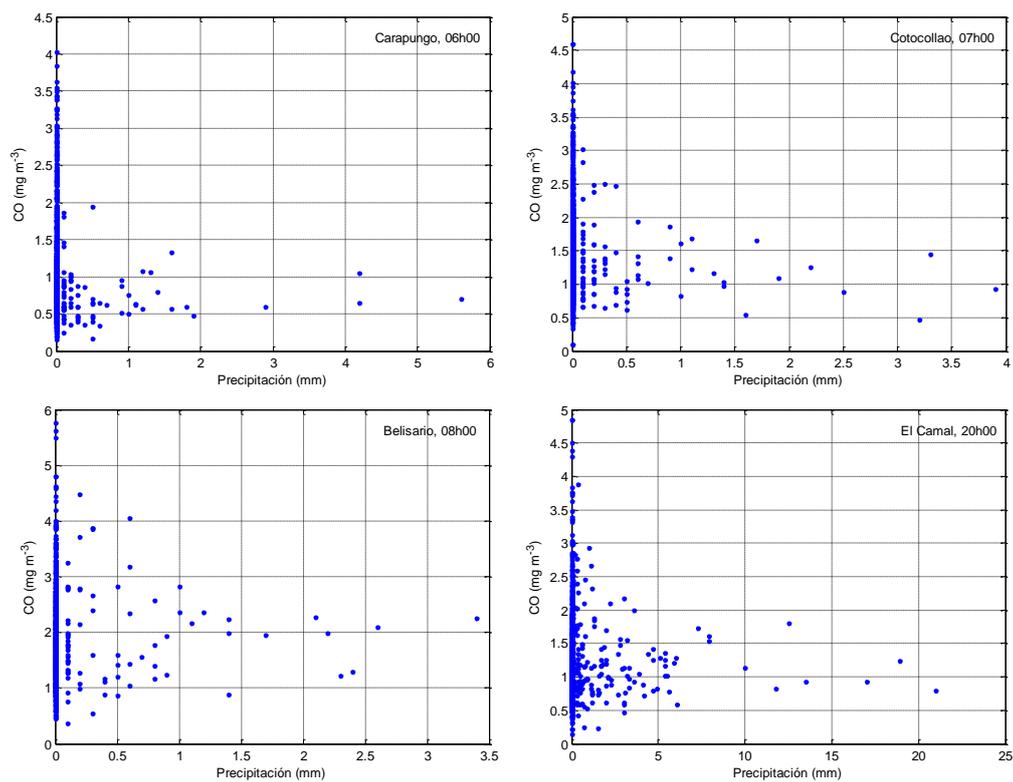


Figura 34. Diagramas de dispersión para precipitación y concentración de CO.

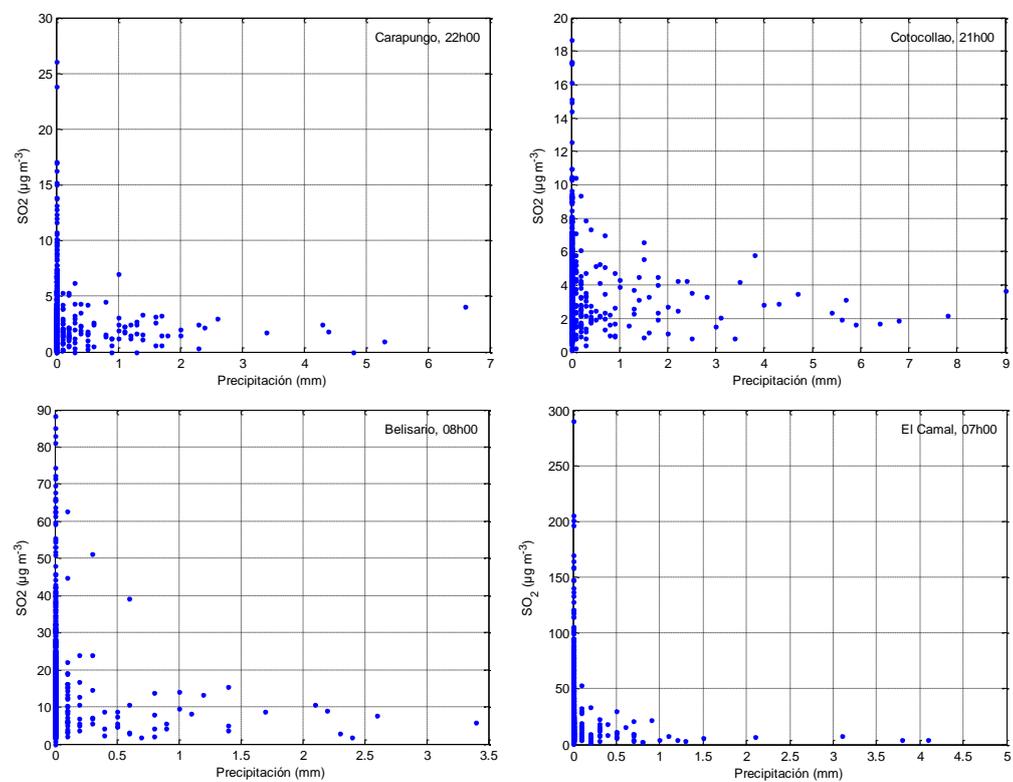


Figura 35. Diagramas de dispersión para precipitación y concentración de SO₂.

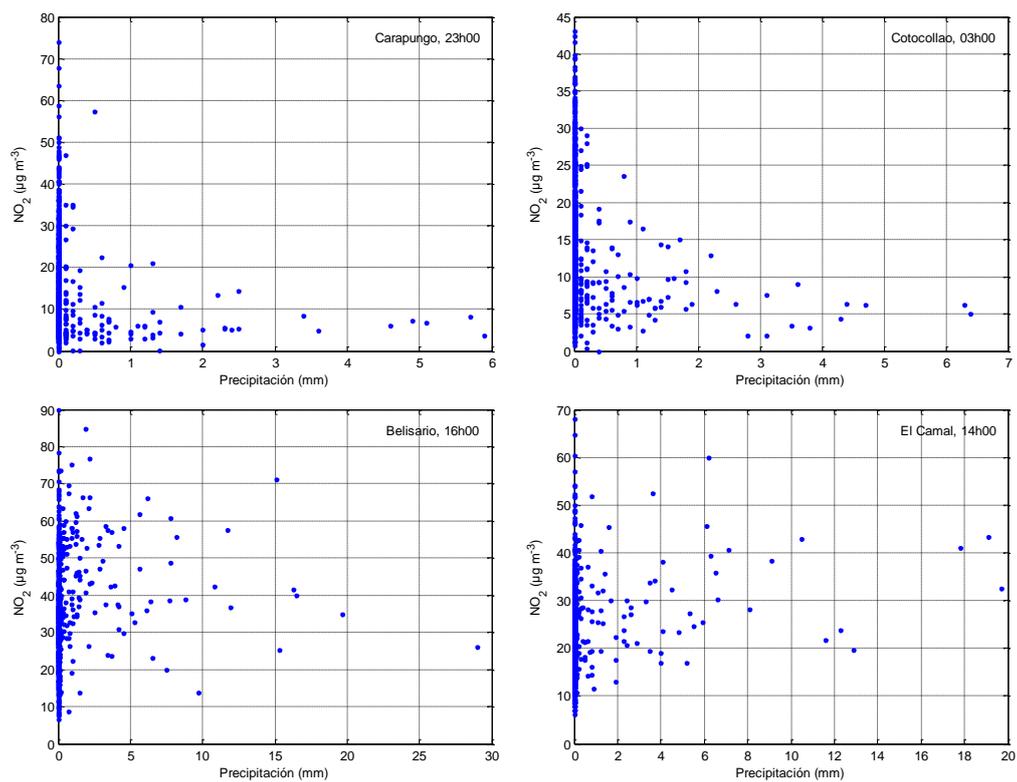


Figura 36. Diagramas de dispersión para precipitación y concentración de NO₂.

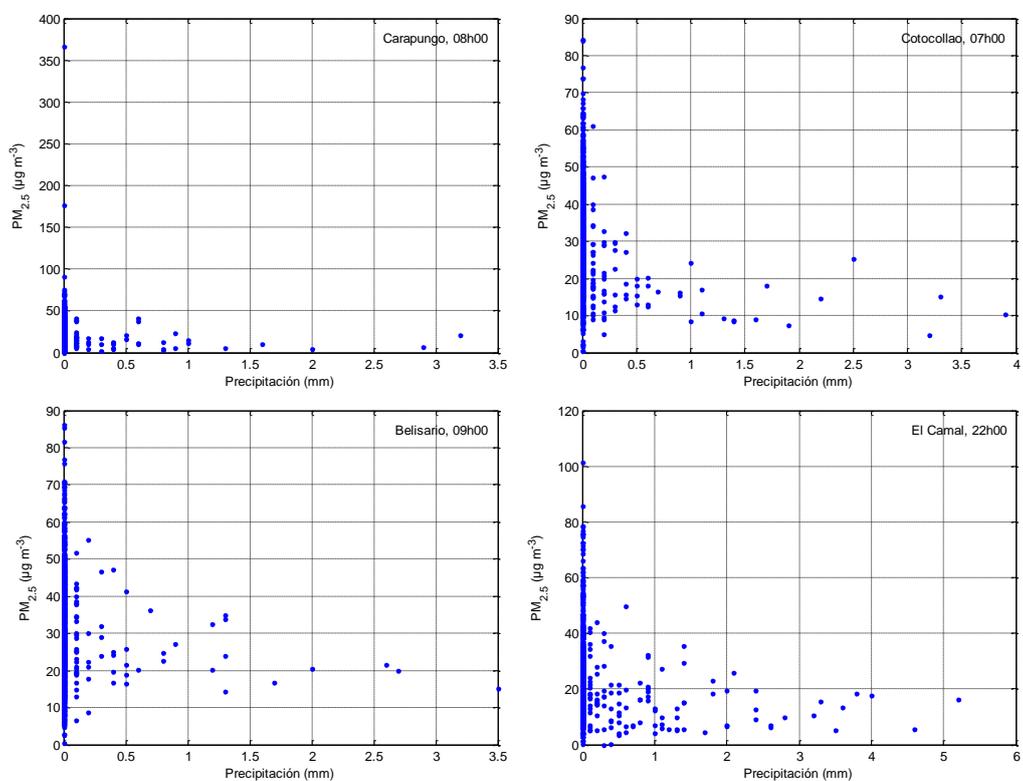


Figura 37. Diagramas de dispersión para precipitación y concentración de PM_{2.5}.

El efecto generado sobre NO_2 es algo distinto a lo descrito; en horas sin radiación solar, se observa el mismo efecto de reducción en las concentraciones dependiendo de la presencia o ausencia de precipitaciones, sin embargo, en horas de radiación solar, las concentraciones aparecen totalmente dispersas a cualquier nivel de precipitación, y las más altas no se presentan necesariamente a precipitaciones nulas; este efecto está relacionado con el efecto que genera la radiación solar en las concentraciones de NO_2 , ya que la existencia de precipitación indica la presencia de nubes, que disminuyen la cantidad de radiación solar incidente y, por lo tanto, reducen la destrucción de NO_2 . Los efectos generados por la disminución en radiación solar y por el aumento de precipitación se combinan, dando lugar a concentraciones muy variadas y dispersas, como las que se observan en los gráficos de la Figura 36 correspondientes a Belisario y El Camal.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las concentraciones de los contaminantes analizados cambian de acuerdo a una interacción compleja entre las variables meteorológicas, que presentan una variación conjunta, y las emisiones del contaminante, lo cual vuelve complicado al análisis de la influencia de una de las variables de forma aislada, aun cuando se intenta reducir al máximo el efecto de la variación de las otras variables, como se realizó en este caso al filtrar datos.

La velocidad de viento ayuda en la dispersión de CO, SO₂ y NO₂ incluso cuando la temperatura, y por lo tanto la altura de la capa de mezcla, es baja; esta variable es más efectiva en los contaminantes primarios. Con PM_{2.5} se producen interacciones distintas a las generadas con los otros contaminantes, que no generan una reducción en las concentraciones finales del material particulado fino. Se recomienda la realización de una caracterización del PM_{2.5} con el fin de identificar las fuentes, lo que puede llevar a una mejor comprensión de las causas de la diferente respuesta de este contaminante ante los aumentos en velocidad de viento.

Las variaciones de temperatura son más importantes en horas sin radiación solar, ya que es en estas horas en las que los cambios en esta variable están más fuertemente relacionados con cambios en las concentraciones de contaminantes. Al igual que la velocidad de viento, las variaciones de temperatura en horas sin radiación solar afectan más a los contaminantes primarios; por el contrario, en horas de sol, cambios en la temperatura afectan más a los contaminantes secundarios.

La radiación solar genera un efecto de reducción en las concentraciones de NO₂, tal como se conoce a partir de las reacciones de destrucción del contaminante.

La precipitación ayuda en la deposición de contaminantes y reduce así las concentraciones, aunque no se pudo identificar claramente una tendencia de disminución más allá de la generada por la presencia o ausencia de precipitación. Al interactuar con la radiación solar, evitando que ésta llegue completamente hasta la zona de la tropósfera correspondiente, la precipitación genera un efecto particular en las concentraciones de NO₂, efecto que no sigue un patrón identificable.

La dispersión observada en las concentraciones de contaminantes puede ser explicada de forma parcial mediante las variaciones en las condiciones meteorológicas, así como también por la resolución temporal de los datos. Es recomendable realizar análisis adicionales con datos que presenten una mejor resolución temporal, así como también la inclusión de información más precisa sobre emisiones de contaminantes.

Se observaron incongruencias en los datos de radiación solar medidos entre los años 2006 y 2008, incongruencias que no han sido recogidas apropiadamente en los reportes de calidad del aire de la Secretaría de Ambiente. Se recomienda realizar una evaluación a los sensores respectivos para esta variable y examinar todos los datos del periodo mencionado, incluyendo otras variables, para descartar errores en las mediciones realizadas durante los años señalados.

Se observaron también comportamientos extraños en la estación de Belisario para muchas de las variables analizadas, tanto meteorológicas como de contaminantes, para los cuales no se puede ofrecer una explicación en el presente documento. Se recomienda la realización de un análisis especializado de esta estación.

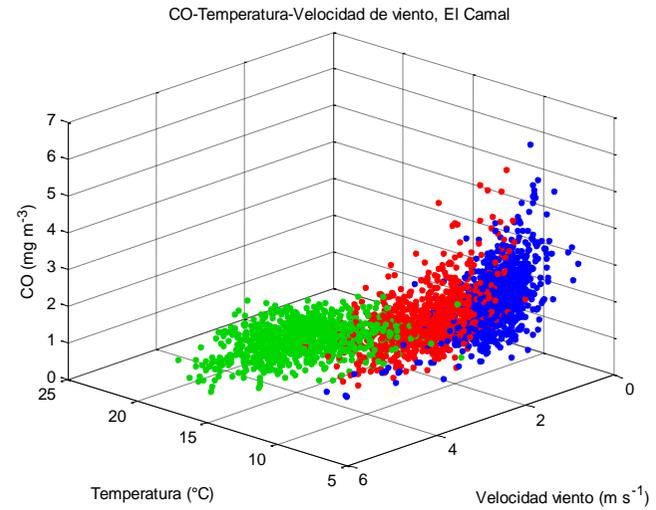
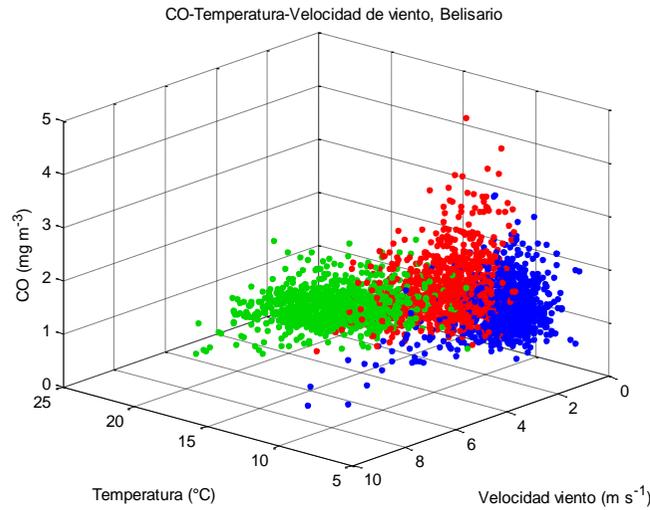
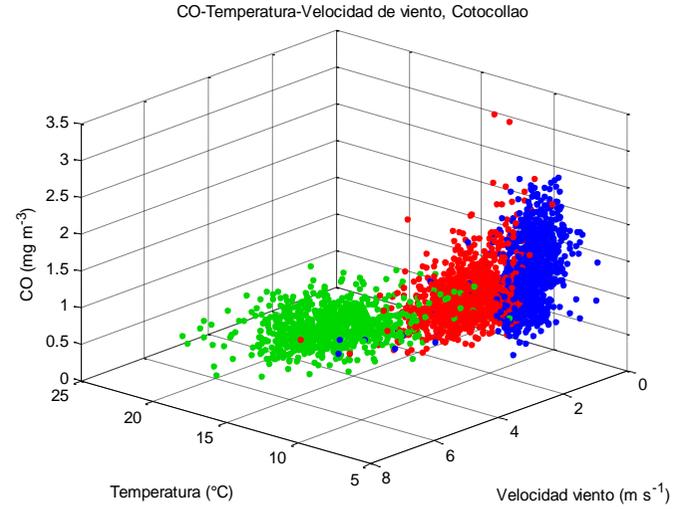
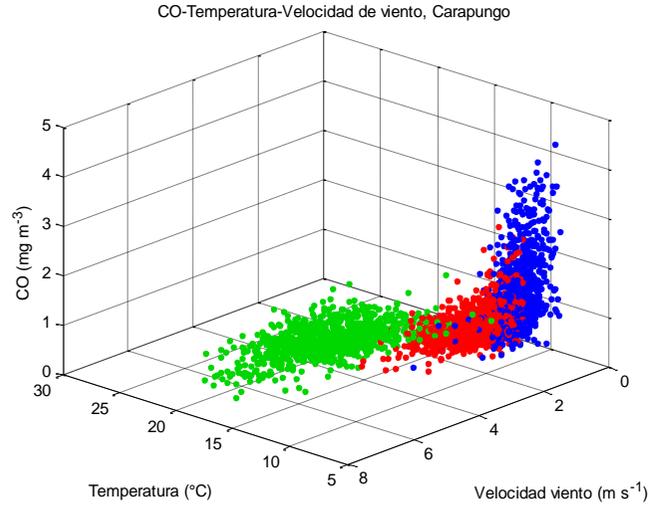
6. BIBLIOGRAFÍA

- Ahrens, D. (2009). *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*. Belmont, CA: Brooks/Cole, Cengage Learning.
- Banco Mundial. (2007). *Environmental Priorities and Poverty Reduction*. Washington, D.C.: The World Bank.
- Bustos Ayoví, F. (2010). *Manual de Gestión y Control Ambiental*. Quito: R. N. Industria Gráfica.
- Carmona, M. (2013). *Evaluación y reclasificación de las estaciones del sistema de monitoreo atmosférico que miden monóxido de carbono*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- CORPAIRE. (2006). *Inventario de emisiones del Distrito Metropolitano de Quito 2003*. Quito.
- CORPAIRE. (2009). *Inventario de emisiones atmosféricas 2007*. Quito.
- E. Roberts Alley & Associates, Inc. (2001). *Manual de Control de la Calidad del Aire*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2010). *Información Censal. Tabulados Censales*. Recuperado el Enero de 2015, de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/informacion-censal-cantonal/>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2011). *Proyecciones poblacionales*. Recuperado el Enero de 2015, de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/>
- Jacoby, W. (2005). *Michigan State University. Regression III: advanced methods*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://polisci.msu.edu/jacoby/icpsr/regress3/lectures/week4/15.Loess.pdf>
- Mathworks. (2014). *Least-Squares Fitting*. Recuperado el noviembre de 2014, de <http://es.mathworks.com/help/curvefit/least-squares-fitting.html>
- Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2014). *Datos Abiertos*. Recuperado el Enero de 2015, de <http://datosabiertos.quito.gob.ec/datastreams/87458/superficie-de-suelo/>
- NARSTO. (2004). *Particulate matter science for policy makers: a NARSTO assessment*. (P. McMurry, M. Shepherd, & J. Vickery, Edits.) Cambridge: Cambridge University Press.

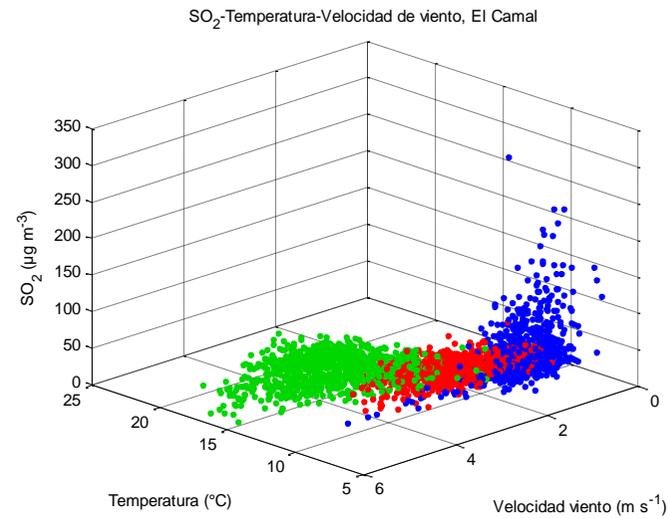
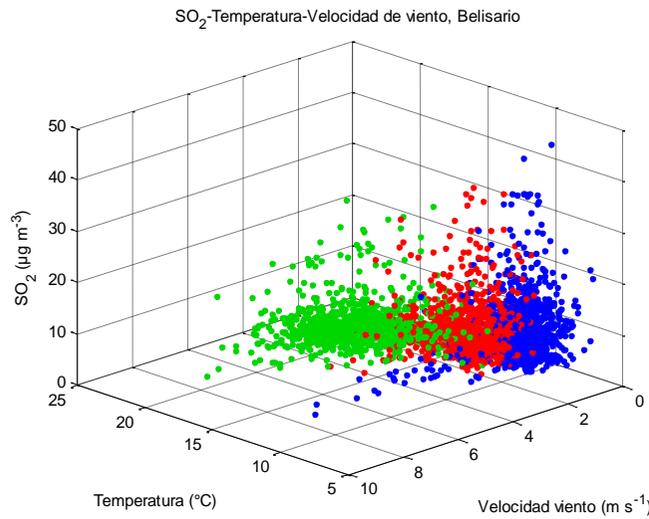
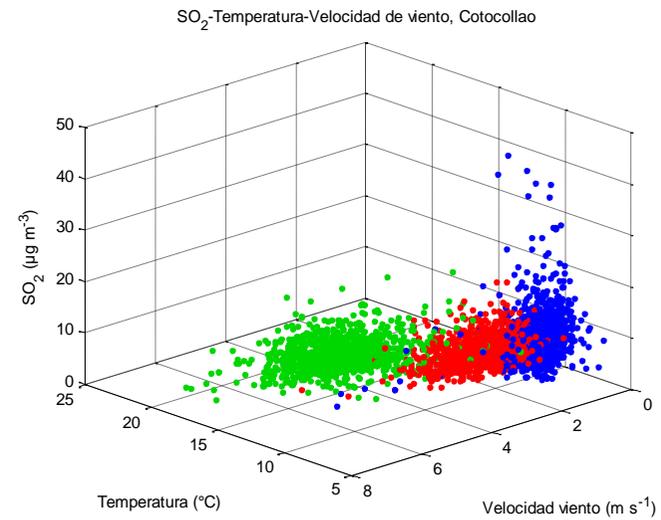
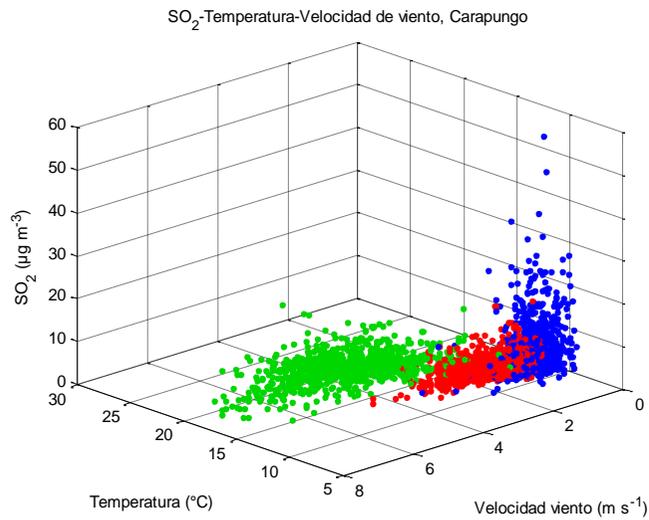
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Air Quality Guidelines. Global Update 2005*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
- Organización Mundial de la Salud. (Marzo de 2014). *Calidad del aire (exterior) y salud*. Recuperado el Noviembre de 2014, de Nota descriptiva N°313:
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- Organización Mundial de la Salud. (s.f.). *Guías de Calidad del Aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. Resumen de evaluación de los riesgos*. Recuperado el Marzo de 2014, de
http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf
- Roberts, A., Brooks, R., & Shipway, P. (2014). Internal combustion engine cold-start efficiency: A review of the problem, causes and potential solutions. *Energy Conversion and Management*, 327-350.
- Royal Society of Chemistry, Analytical Methods Committee. (abril de 2001). *Robust statistics: a method of coping with outliers*. Recuperado el noviembre de 2014, de
http://www.rsc.org/images/robust-statistics-technical-brief-6_tcm18-214850.pdf
- Secretaría de Ambiente. (2010). *Inventario de Emisiones Atmosféricas del Distrito Metropolitano de Quito 2009*. Quito.
- Secretaría de Ambiente. (2012). *Informe técnico 1680-GCA-REC-12. Análisis de Combustibles del Distrito Metropolitano de Quito: campaña junio 2012*. Quito.
- Secretaría de Ambiente. (2012). *Informe Técnico 673-GCA-REC-12. Análisis de combustibles en el Distrito Metropolitano de Quito: campaña noviembre 2012*. Quito.
- Secretaría de Ambiente. (2014). *Informe de la Calidad del Aire de Quito 2013*. (V. Díaz, Ed.) Quito.
- US EPA. (septiembre de 2008). *Review of the Corpaire Ambient Air Monitoring Network for the City of Quito, Ecuador*. Recuperado el febrero de 2015, de
<http://190.152.144.74/paginas/articulos/CORPAIRERPTFNL.zip>
- US EPA. (Junio de 2011). *MOVES Sensivity Analysis: The Impacts of Temperature and Humidity on Emissions*. Recuperado el Noviembre de 2014, de
<http://www.epa.gov/otaq/models/moves/conference2011/sensitivity-moves-2011.pdf>

- US EPA. (2014). *Terminology Services. Terms & Acronyms*. Recuperado el Marzo de 2014, de http://ofmpub.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/termsandacronyms/search.do;jsessionid=PvTvJJkHxD8Fbx2mJdjkqJfPDt12hTrNjvPt7XnlTmyFTyzZHnph!-1597654661?search=
- Vallero, D. (2008). *Fundamentals of Air Pollution* (Cuarta edición ed.). Estados Unidos de América: Academic Press.
- Vanos, J. K., Cakmak, S., Bristow, C., Brion, V., Tremblay, N., Martin, S. L., & Sheridan, S. S. (2013). Synoptic weather typing applied to air pollution mortality among the elderly in 10 Canadian cities. *Environmental Research*, 66-75.
- Virginia Department of Environmental Quality. (2010). *Gaseous Pollutant Monitoring. Criteria Pollutants*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.deq.virginia.gov/Programs/Air/AirMonitoring/GaseousPollutantMonitoring.aspx>
- Wallace, J., & Hobbs, P. (2006). *Atmospheric Science. An Introductory Survey* (Segunda edición ed.). Estados Unidos de América: Academic Press.

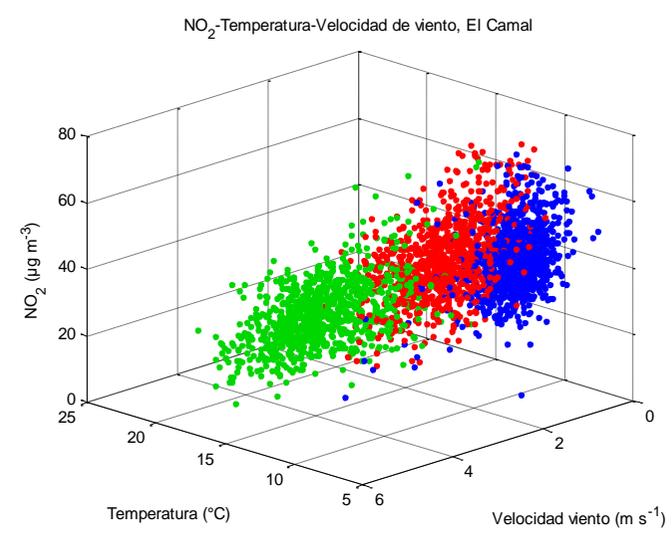
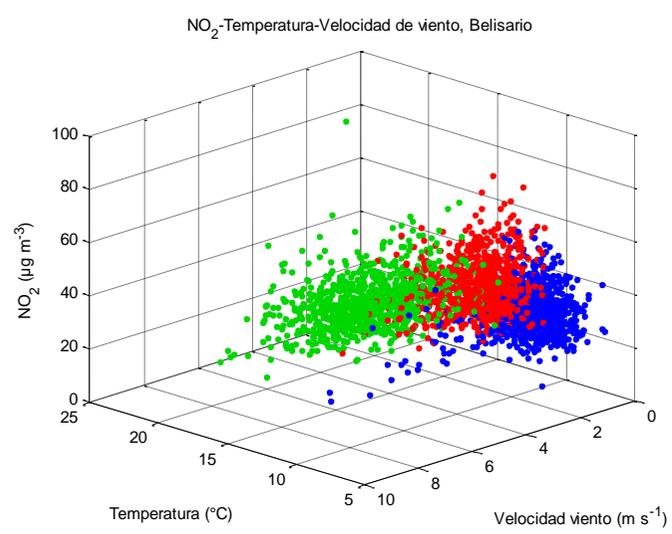
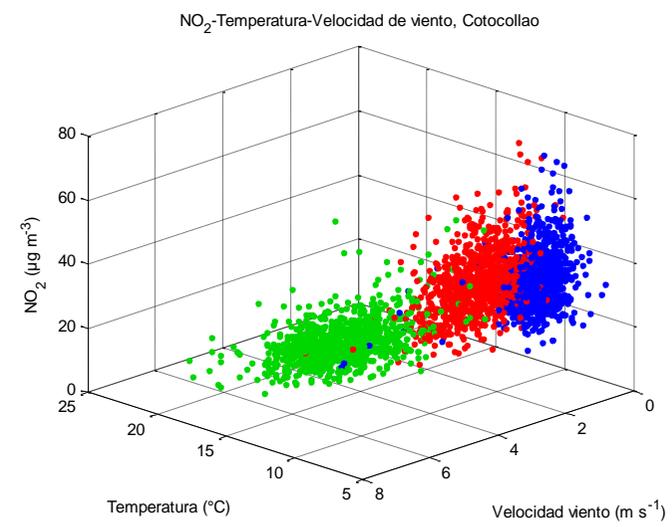
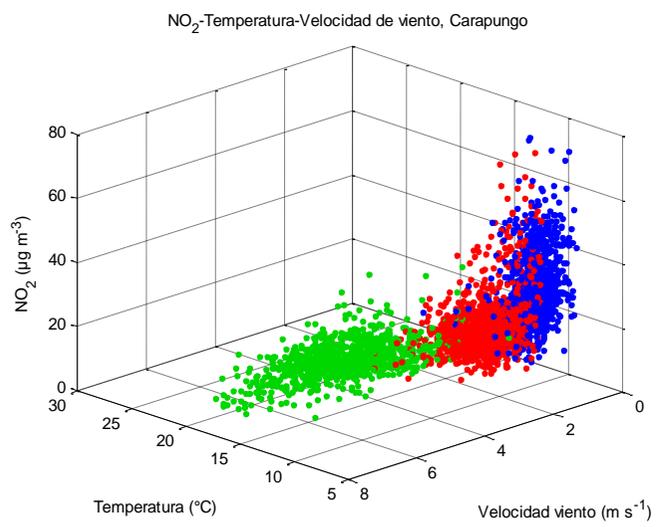
ANEXO A



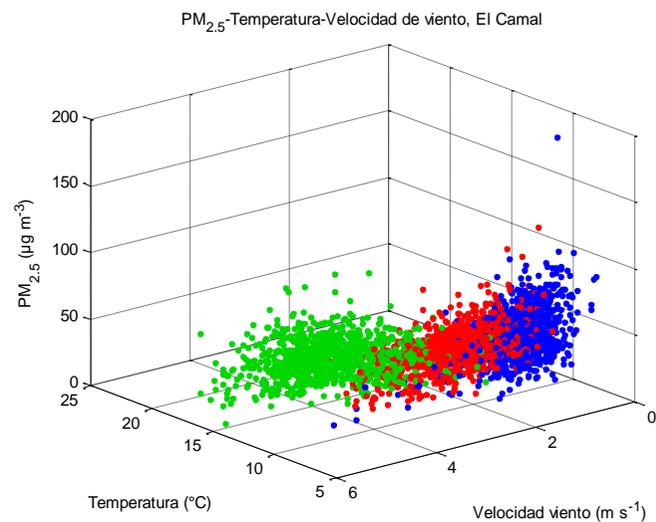
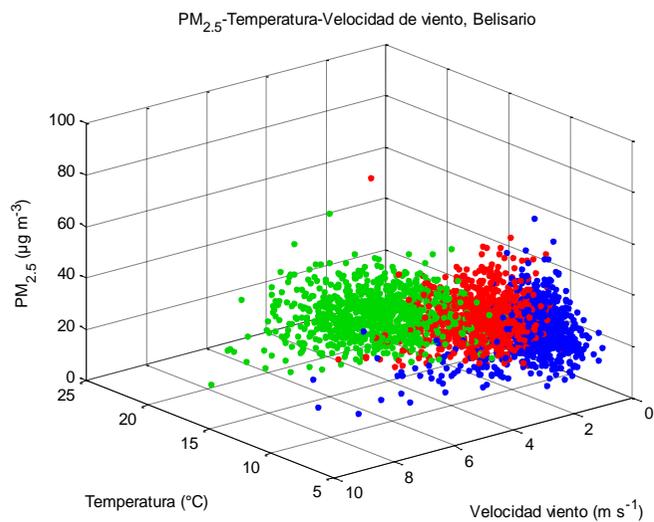
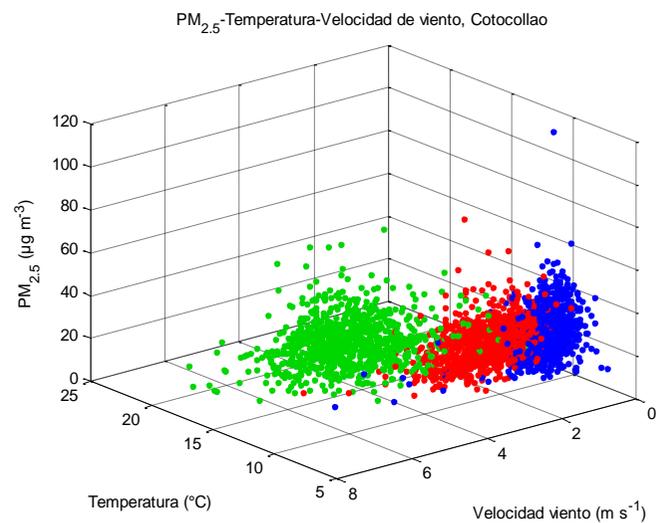
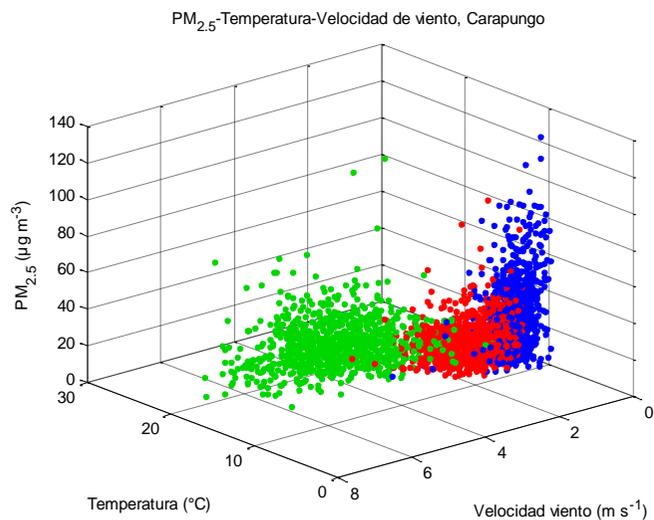
Diagramas de dispersión para concentraciones de CO, velocidad de viento y temperatura, en diferentes estaciones. Los puntos en azul corresponden a las 06h00 horas, los puntos en verde a las 14h00 horas, y los puntos en rojo a las 20h00 horas.



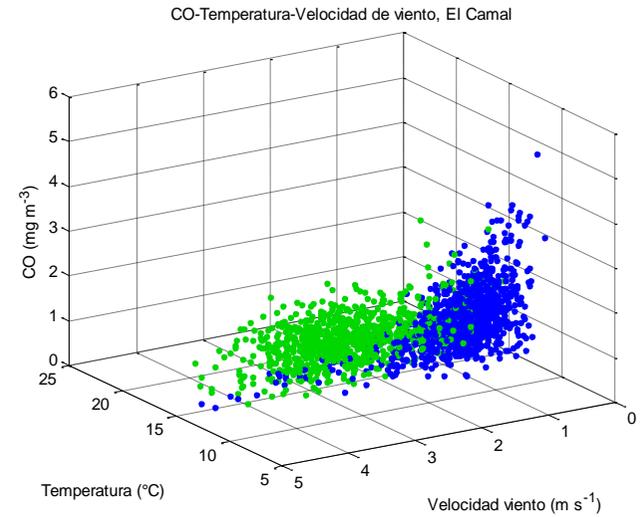
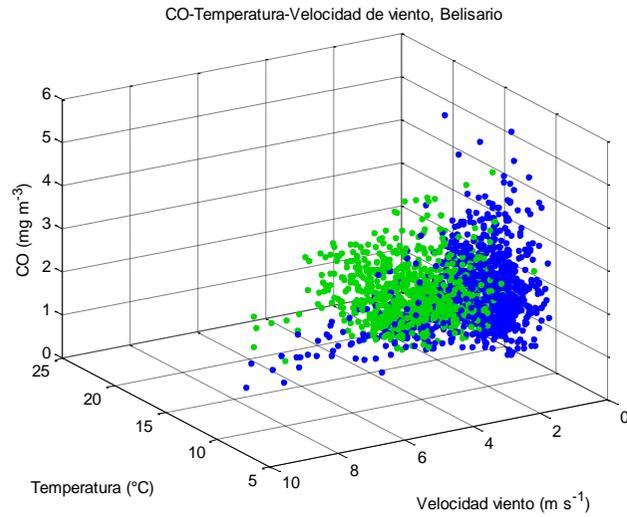
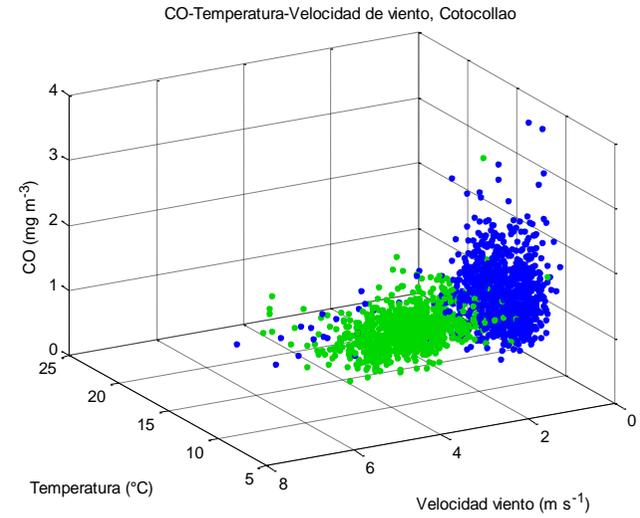
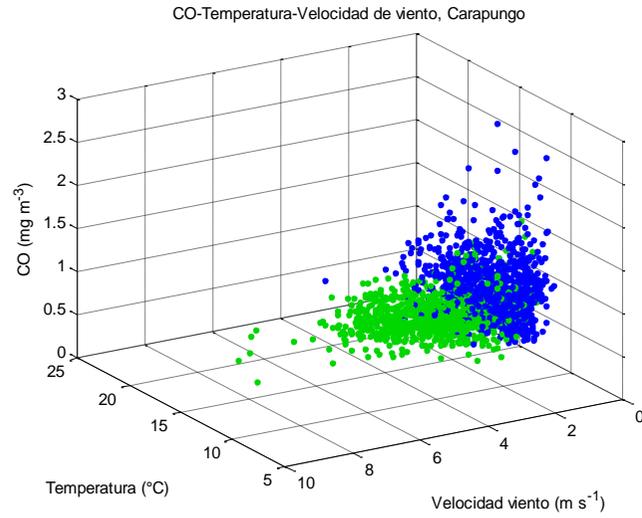
Diagramas de dispersión para concentraciones de SO₂, velocidad de viento y temperatura, en diferentes estaciones. Los puntos en azul corresponden a las 06h00 horas, los puntos en verde a las 14h00 horas, y los puntos en rojo a las 20h00 horas.



Diagramas de dispersión para concentraciones de NO₂, velocidad de viento y temperatura, en diferentes estaciones. Los puntos en azul corresponden a las 06h00 horas, los puntos en verde a las 14h00 horas, y los puntos en rojo a las 20h00 horas.

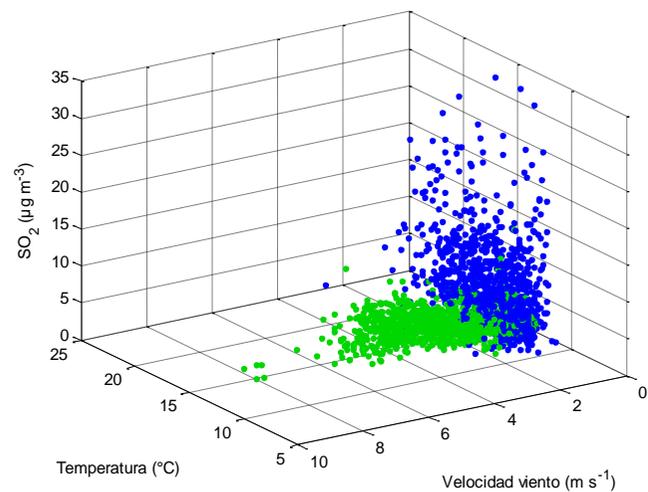


Diagramas de dispersión para concentraciones de PM_{2.5}, velocidad de viento y temperatura, en diferentes estaciones. Los puntos en azul corresponden a las 06h00 horas, los puntos en verde a las 14h00 horas, y los puntos en rojo a las 20h00 horas.

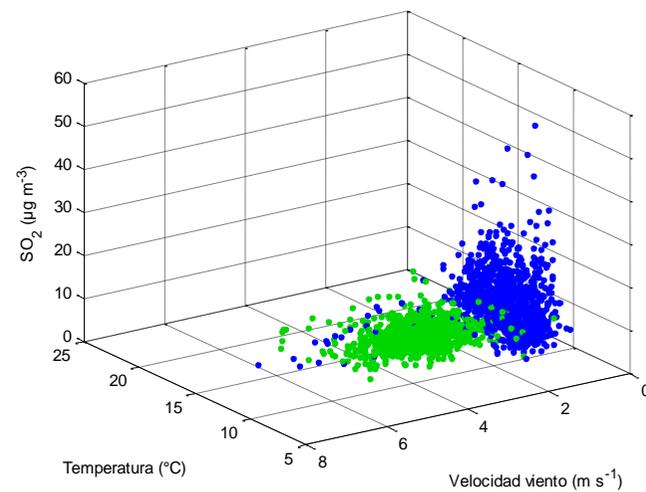


Diagramas de dispersión para concentraciones de CO, velocidad de viento y temperatura, en diferentes estaciones. Los puntos en azul corresponden a las 08h00 horas y los puntos en verde a las 18h00 horas.

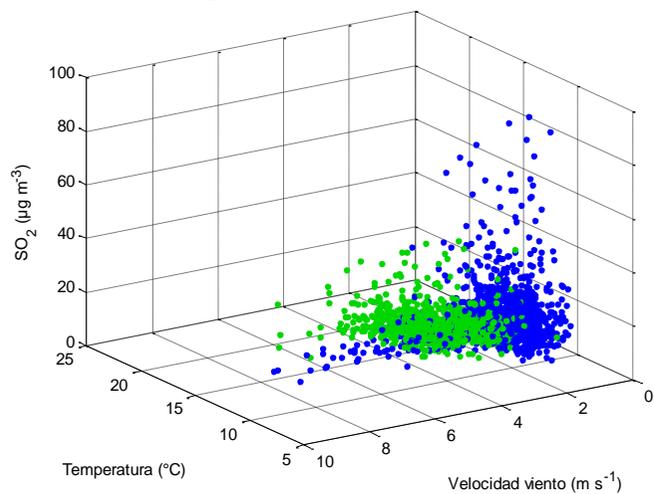
SO₂-Temperatura-Velocidad de viento, Carapungo



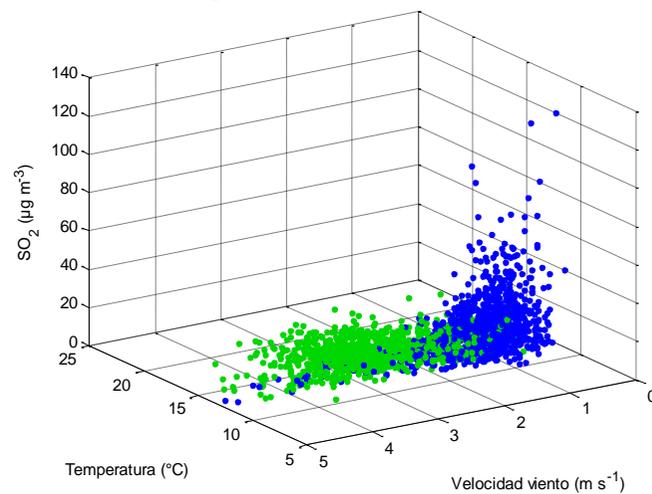
SO₂-Temperatura-Velocidad de viento, Cotocollao



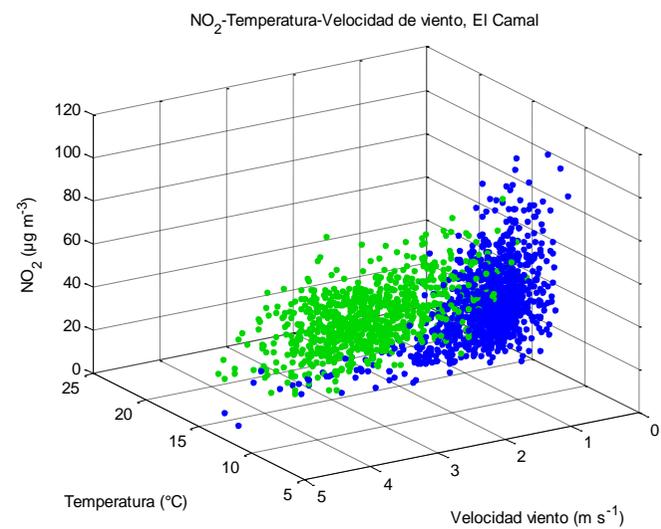
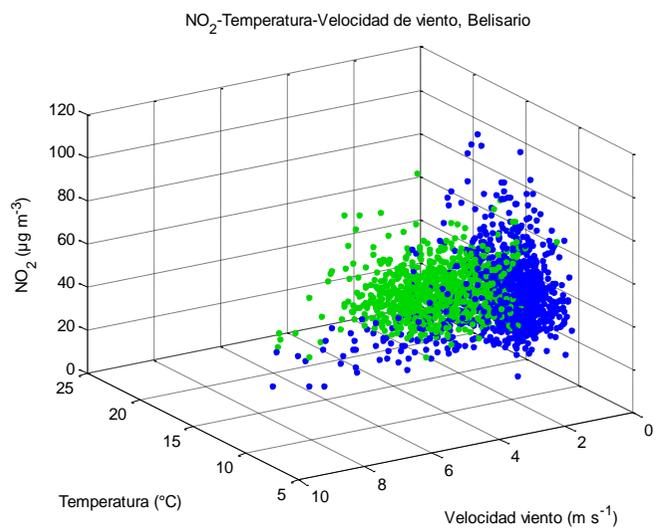
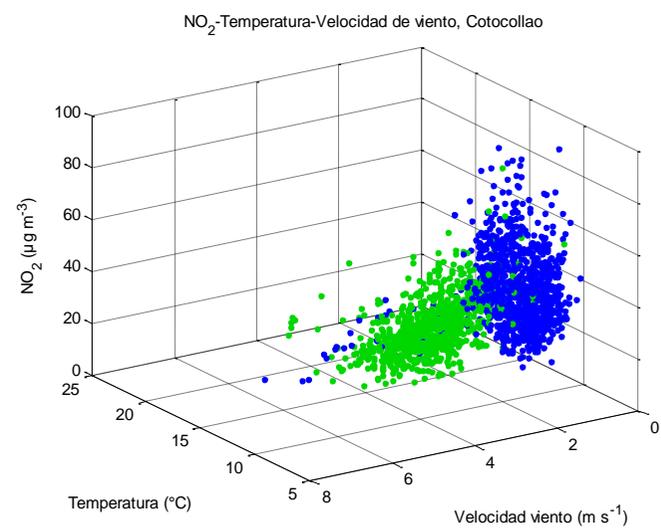
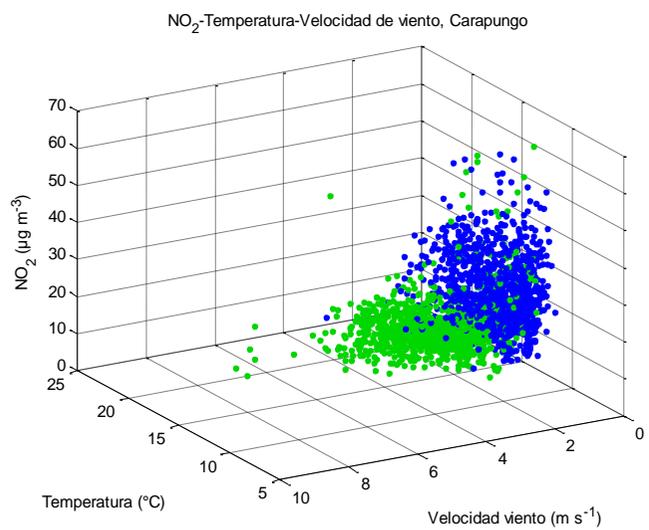
SO₂-Temperatura-Velocidad de viento, Belisario



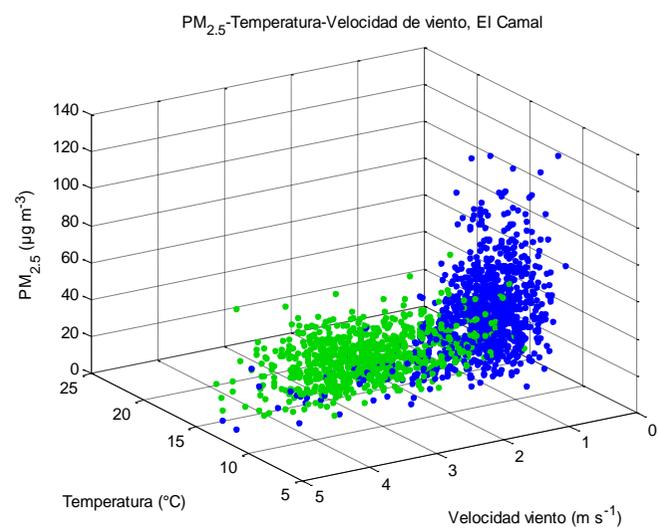
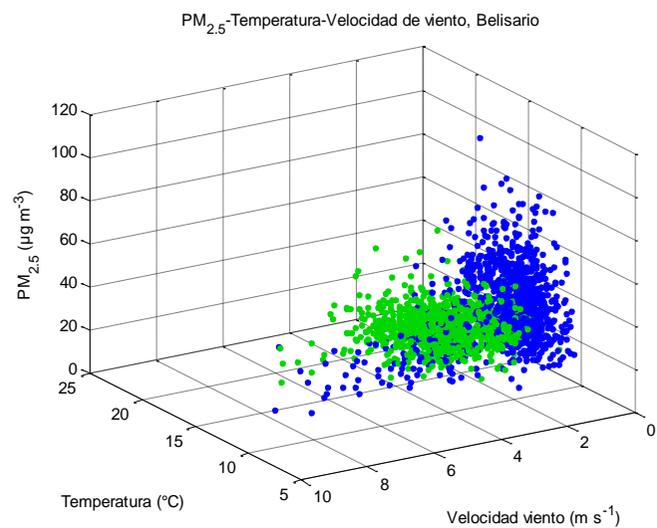
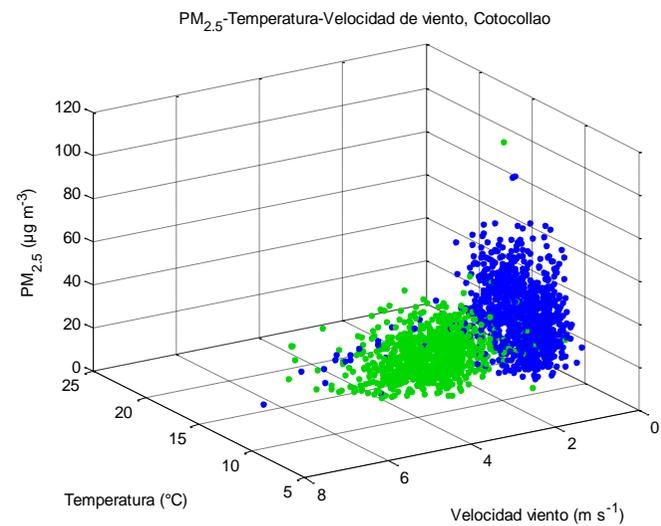
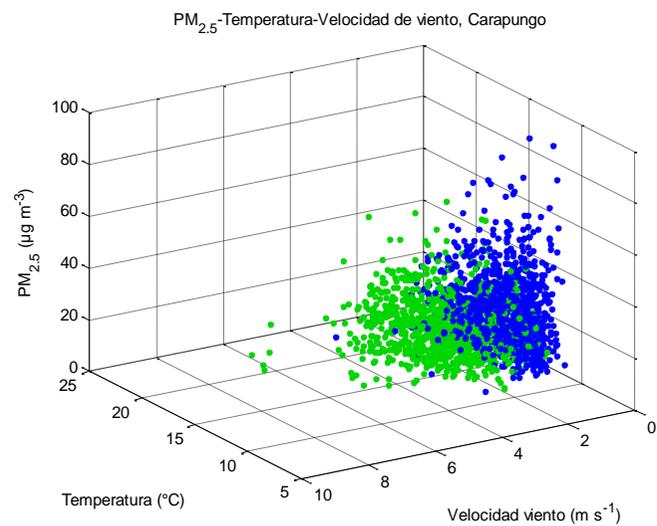
SO₂-Temperatura-Velocidad de viento, El Camal



Diagramas de dispersión para concentraciones de SO₂, velocidad de viento y temperatura, en diferentes estaciones. Los puntos en azul corresponden a las 08h00 horas y los puntos en verde a las 18h00 horas.



Diagramas de dispersión para concentraciones de NO₂, velocidad de viento y temperatura, en diferentes estaciones. Los puntos en azul corresponden a las 08h00 horas y los puntos en verde a las 18h00 horas.



Diagramas de dispersión para concentraciones de PM_{2.5}, velocidad de viento y temperatura, en diferentes estaciones. Los puntos en azul corresponden a las 08h00 horas y los puntos en verde a las 18h00 horas.

ANEXO B

Datos estadísticos relativos a los datos horarios utilizados en los gráficos del Anexo A, en la estación de Carapungo.

Hora	06h00	14h00	20h00	08h00	18h00
Concentración de CO (mg m⁻³)					
Menor	0,16	0,00	0,00	0,20	0,01
Mayor	4,35	1,45	2,29	2,58	1,70
Rango	4,19	1,45	2,29	2,38	1,69
Mediana	0,99	0,40	0,58	0,76	0,53
Concentración de SO₂ (µg m⁻³)					
Menor	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Mayor	55,59	18,42	16,54	34,52	14,49
Rango	55,58	18,42	16,54	34,52	14,49
Mediana	4,35	2,08	2,15	5,46	2,05
Concentración de NO₂ (µg m⁻³)					
Menor	4,27	0,09	2,65	3,42	1,99
Mayor	76,27	35,50	70,79	60,95	64,95
Rango	72,00	35,41	68,14	57,53	62,96
Mediana	26,70	6,39	14,78	20,27	12,20
Concentración de PM_{2.5} (µg m⁻³)					
Menor	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00
Mayor	129,49	114,28	88,35	366,06	66,87
Rango	127,54	114,28	88,35	366,06	66,87
Mediana	26,78	13,20	14,63	20,37	16,67
Velocidad de viento (m s⁻¹)					
Menor	0,05	0,58	0,24	0,19	0,53
Mayor	4,28	7,41	4,52	4,40	8,24
Rango	4,23	6,83	4,28	4,21	7,71
Mediana	0,71	3,58	1,45	0,95	2,50
Temperatura (°C)					
Menor	6,53	12,50	9,75	9,78	10,19
Mayor	14,14	25,28	17,06	22,96	21,29
Rango	7,61	12,78	7,31	13,18	11,10
Mediana	11,04	19,24	12,96	13,88	14,93

Datos estadísticos relativos a los datos horarios utilizados en los gráficos del Anexo A, en la estación de Cotocollao.

Hora	06h00	14h00	20h00	08h00	18h00
Concentración de CO (mg m-3)					
Menor	0,02	0,00	0,13	0,00	0,11
Mayor	2,46	1,21	3,36	3,79	3,36
Rango	2,44	1,21	3,23	3,79	3,25
Mediana	1,06	0,37	0,75	1,09	0,59
Concentración de SO2 (µg m-3)					
Menor	0,02	0,00	0,12	0,91	0,05
Mayor	42,91	17,20	16,92	50,29	17,63
Rango	42,89	17,20	16,80	49,38	17,58
Mediana	5,89	2,01	3,21	8,22	2,41
Concentración de NO2 (µg m-3)					
Menor	10,11	0,53	6,20	8,66	4,82
Mayor	70,38	51,20	71,66	90,41	84,24
Rango	60,27	50,67	65,46	81,75	79,42
Mediana	29,09	8,13	26,56	32,69	19,35
Concentración de PM2.5 (µg m-3)					
Menor	1,54	0,00	0,00	2,39	0,00
Mayor	119,02	65,06	71,21	404,02	161,87
Rango	117,48	65,06	71,21	401,63	161,87
Mediana	23,18	11,06	13,79	27,97	10,77
Velocidad de viento (m s-1)					
Menor	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
Mayor	5,41	6,99	5,37	6,39	5,55
Rango	5,41	6,98	5,36	6,38	5,54
Mediana	0,70	3,28	1,40	0,85	2,48
Temperatura (°C)					
Menor	5,22	11,52	9,92	8,72	9,34
Mayor	14,25	23,25	16,97	18,76	21,03
Rango	9,03	11,73	7,05	10,04	11,69
Mediana	10,27	18,24	12,80	12,43	14,61

Datos estadísticos relativos a los datos horarios utilizados en los gráficos del Anexo A, en la estación de Belisario.

Hora	06h00	14h00	20h00	08h00	18h00
Concentración de CO (mg m⁻³)					
Menor	0,08	0,00	0,33	0,43	0,33
Mayor	3,17	2,65	4,55	5,76	4,66
Rango	3,09	2,65	4,22	5,33	4,33
Mediana	1,04	0,78	1,27	1,72	1,44
Concentración de SO₂ (µg m⁻³)					
Menor	0,00	0,11	0,31	0,00	0,66
Mayor	44,52	32,19	35,36	88,24	42,99
Rango	44,52	32,08	35,05	88,24	42,33
Mediana	6,99	4,71	6,49	12,27	7,02
Concentración de NO₂ (µg m⁻³)					
Menor	0,21	6,74	14,58	4,12	14,39
Mayor	57,55	87,66	76,82	111,22	92,36
Rango	57,34	80,92	62,24	107,10	77,97
Mediana	26,97	23,87	34,55	40,29	37,89
Concentración de PM_{2.5} (µg m⁻³)					
Menor	0,81	0,00	1,98	1,82	0,00
Mayor	63,38	53,29	85,92	108,98	62,48
Rango	62,57	53,29	83,94	107,16	62,48
Mediana	19,22	16,55	20,04	35,21	21,45
Velocidad de viento (m s⁻¹)					
Menor	0,00	0,23	0,09	0,01	0,48
Mayor	8,02	8,64	5,68	8,11	6,76
Rango	8,02	8,41	5,59	8,10	6,28
Mediana	0,95	2,84	1,65	1,33	2,60
Temperatura (°C)					
Menor	5,84	10,29	9,25	8,06	9,29
Mayor	14,88	23,50	18,06	17,39	20,46
Rango	9,04	13,21	8,81	9,33	11,17
Mediana	10,42	18,57	12,91	12,18	15,28

Datos estadísticos relativos a los datos horarios utilizados en los gráficos del Anexo A, en la estación de El Camal.

Hora	06h00	14h00	20h00	08h00	18h00
Concentración de CO (mg m⁻³)					
Menor	0,20	0,00	0,04	0,15	0,02
Mayor	6,04	1,83	4,84	5,19	3,65
Rango	5,84	1,83	4,80	5,04	3,63
Mediana	1,63	0,65	1,12	1,25	0,97
Concentración de SO₂ (µg m⁻³)					
Menor	0,79	0,00	0,12	0,63	0,15
Mayor	306,76	19,99	69,78	131,40	34,81
Rango	305,97	19,99	69,66	130,77	34,66
Mediana	14,67	3,39	6,20	11,62	4,58
Concentración de NO₂ (µg m⁻³)					
Menor	0,00	6,21	14,11	7,68	10,11
Mayor	72,50	68,00	73,94	109,37	89,19
Rango	72,50	61,79	59,83	101,69	79,08
Mediana	38,74	22,07	39,02	37,08	34,49
Concentración de PM_{2.5} (µg m⁻³)					
Menor	3,74	0,02	1,34	1,63	0,75
Mayor	186,16	75,99	108,44	130,32	64,93
Rango	182,42	75,97	107,10	128,69	64,18
Mediana	38,18	15,60	24,66	37,55	19,35
Velocidad de viento (m s⁻¹)					
Menor	0,03	0,74	0,20	0,22	0,60
Mayor	4,52	5,72	3,89	4,97	4,80
Rango	4,49	4,98	3,69	4,75	4,20
Mediana	0,90	2,90	1,66	1,04	2,51
Temperatura (°C)					
Menor	5,08	11,30	9,53	8,20	9,70
Mayor	14,88	23,84	17,42	17,38	21,40
Rango	9,80	12,54	7,89	9,18	11,70
Mediana	10,72	18,02	13,17	12,22	14,80