

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE DE INGENIERÍA

**“DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA CONTAMINACIÓN
AMBIENTAL ATMOSFÉRICA EN LOS NIVELES DE pH Y
SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS DEL AGUA LLUVIA DEL
CENTRO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

DANIEL ALEJANDRO PAZMIÑO VERNAZA

DIRECTOR: Ing. Luis Jaramillo Msc.

CODIRECTOR: Dr. Ericsson López

Quito, febrero de 2007

DECLARACIÓN

Yo Daniel Alejandro Pazmiño Vernaza declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

**Daniel Alejandro Pazmiño
Vernaza**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Daniel Alejandro Pazmiño Vernaza, bajo mi supervisión.

Ing. Luis Jaramillo Msc.
DIRECTOR DE PROYECTO

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
CAPITULO 1.....	3
1.1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1.2 HIPÓTESIS	5
1.2 OBJETIVOS	6
1.1.3 OBJETIVO GENERAL.....	6
1.1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS	6
1.3 JUSTIFICACION	7
CAPITULO 2.....	8
2.1 REVISIÓN BIBLIOGRAFICA	8
2.1.1 LA ATMÓSFERA.....	8
2.1.2 CAPAS ATMOSFÉRICAS.....	8
2.2 ASPECTOS RELEVANTES DE METEOROLOGÍA	11
2.2.1 CONCEPTOS DE METEOROLOGÍA	11
2.2.2 MOVIMIENTO ATMOSFÉRICO HORIZONTAL	12
2.2.3 MOVIMIENTO VERTICAL EN LA ATMÓSFERA.....	15
2.2.4 VIENTOS.....	18
2.2.5 ASPECTOS GENERALES DEL COMPORTAMIENTO METEOROLÓGICO EN EL DQM	19
2.3 EVOLUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO	21
2.3.1 INFRAESTRUCTURA IMPLEMENTADA EN EL DMQ PARA LA MEDICIÓN DE LOS CONTAMINANTES DEL AIRE	21
2.3.2 NORMATIVA LEGAL.....	23
2.3.3 RESULTADOS DE LOS MONITOREOS DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL DMQ	29
2.4 INFLUENCIA DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL ATMOSFÉRICA EN LOS NIVELES DE PH DEL AGUA LLUVIA.....	36
2.4.1 INFORMACIÓN BÁSICA	36
2.4.2 ANTECEDENTES.....	37
2.4.3 FORMACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA	39
2.4.4 CINÉTICA Y TERMODINÁMICA DE LOS CONTAMINANTES PRECURSORES DE LA LLUVIA ÁCIDA	40
2.5 EFECTOS DE LA LLUVIA ACIDA.....	44
2.5.1 EN LOS ECOSISTEMAS.....	44
2.5.2 EN LA SALUD PÚBLICA	45
2.5.3 EN LA INFRAESTRUCTURA FÍSICA.....	45
CAPITULO 3.....	47
3.1 METODOLOGÍA Y MATERIALES EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN	47
3.1.1 METODOLOGÍA	47

3.1.2 MATERIALES	49
CAPITULO 4.....	50
4.1 RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	50
4.1.1 RESULTADOS	50
4.1.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	66
CAPITULO 5.....	70
5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
5.1.1 CONCLUSIONES	70
5.1.2 RECOMENDACIONES.....	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
ANEXOS.....	73

LISTA DE FIGURAS, TABLAS Y ANEXOS

Figura 2-1: Circulación del viento debido a gradientes de temperatura.	13
Figura 2-2: Ubicación de los sitios de muestreo de la calidad de aire en el DMQ	22
Tabla 2-1: Contaminantes del aire y técnicas de medición utilizadas en la Red Automática de Monitoreo de CORPAIRE	23
Tabla 2-2: Resumen de la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire Ambiente....	25
Tabla 2-3: Valores máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión.....	26
Tabla 2-4: Límites máximos permisibles para emisiones gaseosas de incineradores de desechos peligrosos.....	27
Tabla 2-5: Límites máximos permisibles de emisiones para generadores eléctricos.....	27
Tabla 2-6: Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico que solo requieren desinfección	28
Tabla 2-7: Indicadores de calidad del aire, PM _{2.5} (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en 24 horas	29
Figura 1-3: Concentraciones promedio anuales de material particulado fino (PM _{2.5}) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	30
Tabla 2-8: Indicadores de Calidad del Aire, SO ₂ (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en 24 horas	30
Figura 2-4: Concentraciones promedio anuales de dióxido de azufre (SO ₂) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	31
Tabla 2-9: Indicadores de calidad del aire, NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en 24 horas	31
Figura 2-5: Concentraciones promedio anuales de dióxido de nitrógeno (NO ₂) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	32
Figura 2-6: Emisiones anuales en el DMQ 2003 (toneladas/año).....	32
Tabla 2-10: Constantes de equilibrio para la reacción de oxidación del SO ₂ a SO ₃	41
Tabla 2-11: Constantes de equilibrio para la formación de monóxido de nitrógeno a partir de oxígeno y nitrógeno moleculares	43
Tabla 4-1: Estadísticas descriptivas de los valores de pH	50
Tabla 4-2: Rangos de clase y frecuencia acumulada para valores de pH	50
Figura 4-1: Histograma de frecuencias para valores de pH para el periodo 2000- 2006.....	51
Figura 4-2: Valores de pH en función del tiempo para el periodo 2000-2006.	51
Tabla 4-3: Estadísticas descriptivas de los valores de sólidos totales disueltos.	52
Tabla 4-4: Rangos de clase y frecuencia acumulada para valores de sólidos totales disueltos	52
Figura 4-3: Histograma de frecuencias para valores de sólidos totales disueltos para el periodo 2000-2006.....	53
Figura 4-4: Sólidos totales disueltos en función del tiempo para el periodo 2004- 2006.....	53
Figura 4-5: Concentración de SO ₂ promedio en el DMQ vs. Tiempo.....	54

Figura 4-6: pH vs. Concentración promedio de SO ₂ estación Cotocollao	54
Figura 4-7: pH vs. Concentración promedio de SO ₂ estación Carapungo	55
Figura 4-8: pH vs. Concentración promedio de SO ₂ estación Jipijapa.....	55
Figura 4-9: pH vs. Concentración promedio de SO ₂ estación Belisario	56
Figura 4-10: pH vs. Concentración promedio de SO ₂ estación El Camal	56
Figura 4-11: pH vs. Concentración promedio de SO ₂ estación Centro	57
Figura 4-12: pH vs. Concentración promedio de SO ₂ en el DMQ	57
Figura 4-13: Concentración de NO ₂ promedio en el DMQ vs. Tiempo	58
Figura 4-14: pH vs. Concentración promedio de NO ₂ estación Carapungo.....	58
Figura 4-15: pH vs. Concentración promedio de NO ₂ estación Centro.....	59
Figura 4-16: pH vs. Concentración promedio de NO ₂ estación Belisario.....	59
Figura 4-17: pH vs. Concentración promedio de NO ₂ estación El Camal	60
Figura 4-18: pH vs. Concentración promedio de NO ₂ estación Jipijapa	60
Figura 4-19: pH vs. Concentración promedio de NO ₂ estación Guamani	61
Figura 4-20: pH vs. Concentración promedio de NO ₂ estación Cotocollao.....	61
Figura 4-21: pH vs. Concentración promedio de NO ₂ en el DMQ	62
Figura 4-22: Concentración de PM _{2.5} promedio en el DMQ vs. Tiempo	62
Figura 4-23: STD vs. Concentración promedio de PM _{2.5} estación Cotocollao ...	63
Figura 4-24: STD vs. Concentración promedio de PM _{2.5} estación Jipijapa.....	63
Figura 4-25: STD vs. Concentración promedio de PM _{2.5} estación Carapungo ...	64
Figura 4-26: STD vs. Concentración promedio de PM _{2.5} estación El Camal	64
Figura 4-27: STD vs. Concentración promedio de PM _{2.5} estación Belisario	65
Figura 4-28: STD vs. Concentración promedio de PM _{2.5} estación Centro	65
Figura 4-28: STD vs. Concentración promedio de PM _{2.5} en el DMQ	66
Tabla 4-5: Estadísticas de regresión para el modelo pH vs. SO ₂ y NO ₂	66
Anexo 1: Valores de pH y sólidos totales disueltos (mg/lit) empleados en los análisis de correlación	73
Anexo 1: Valores de pH y sólidos totales disueltos (mg/lit) empleados en los análisis de correlación	74
Anexo 1: Valores de pH y sólidos totales disueltos (mg/lit) empleados en los análisis de correlación	75
Anexo 2: Valores de concentración de SO ₂ ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación.....	76
Anexo 2: Valores de concentración de SO ₂ ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación.....	77
Anexo 2: Valores de concentración de SO ₂ ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación.....	78
Anexo 3: Valores de concentración de NO ₂ ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación.....	79
Anexo 3: Valores de concentración de NO ₂ ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación.....	80
Anexo 3: Valores de concentración de NO ₂ ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación.....	81

Anexo 2: Valores de concentración de $PM_{2.5}$ ($\mu g / m^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación	82
Anexo 3: Valores de concentración de $PM_{2.5}$ ($\mu g / m^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación	83
Anexo 4: Valores de concentración de $PM_{2.5}$ ($\mu g / m^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación	84

RESUMEN

Es un hecho científico comprobado a nivel internacional la marcada influencia que existe entre la contaminación ambiental atmosférica y los niveles de pH del agua lluvia. Los óxidos de azufre y de nitrógeno (SO_x y NO_x) en concentraciones elevadas en la atmósfera son contaminantes que reaccionan con el agua lluvia para formar ácidos sulfúrico y nítrico respectivamente. Cuando el agua lluvia alcanza un valor de pH menor a 5.6 es considerada como lluvia ácida la misma que tiene graves efectos para los ecosistemas. Por otra parte, el agua lluvia además de reaccionar con los óxidos de azufre y nitrógeno de la atmósfera puede también “arrastrar” otro tipo de contaminantes como el material particulado, incrementando así la cantidad de sólidos totales disueltos en el agua lluvia que precipita. La variación de la concentración de sólidos totales disueltos del agua lluvia se puede considerar como un nuevo indicador de calidad ambiental atmosférica.

El Observatorio Astronómico de Quito en colaboración con el Centro de Investigaciones y Control Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional mantienen un monitoreo continuo desde el año 2000 de los valores de pH y de sólidos totales disueltos del agua lluvia que precipita en la estación meteorológica del Observatorio ubicada en el centro de Quito en el parque de la Alameda. Con estos datos y los datos que mantiene la Corporación para el Mejoramiento del Aire en Quito (CORPAIRE) respecto de la concentración de contaminantes atmosféricos en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), se realizó un análisis de la influencia de los contaminantes SO₂ y NO₂ en los niveles de pH del agua lluvia monitoreada; y además, se estudió la variación de la concentración de sólidos totales disueltos del agua con respecto a la variación de material particulado (PM_{2.5}) en la atmósfera.

El estudio determinó que solo un 10% de las observaciones (durante el período 2000-2006) corresponden a lluvia ácida. Por otra parte, aproximadamente un 16% de las variaciones de la concentración de los sólidos totales disueltos del agua lluvia muestreada se encuentran influenciadas por variaciones del nivel de concentración de material particulado ($PM_{2.5}$) en la atmósfera de Quito. El bajo porcentaje de observaciones correspondientes a lluvia ácida se explica principalmente debido a que los niveles de contaminación ambiental en el DMQ son bajos comparados a otras ciudades y países en los que el porcentaje de episodios de lluvia ácida si es elevado. Finalmente, la cantidad de sólidos totales disueltos en el agua lluvia se podría explicar de mejor forma si se incluye en el modelo las variaciones de material particulado PM_{10} .

CAPITULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

1.1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación ambiental en el Distrito Metropolitano de Quito es un hecho que preocupa cada día más a sus ciudadanos y autoridades. En los últimos años, diversas acciones se han emprendido para conocer en detalle la problemática (monitoreos ambientales permanentes, inventarios de emisiones, entre otros) y se han tomado decisiones importantes para contribuir a la solución del problema como el establecimiento de un marco legal que estipula la obligatoriedad de la Revisión Técnica Vehicular, la disposición de expender combustibles en el DQM con concentraciones de azufre considerablemente menores que en el resto del país (aunque lejos todavía de estándares internacionales), el establecimiento de un Plan Maestro de Transporte, entre otras medidas que constituyen un gran avance en lo que respecta a la gestión ambiental del recurso aire en nuestro país.

La sistematización y cuantificación del problema a través de la investigación ha sido el factor determinante para la adecuada toma de decisiones. En este sentido, el presente estudio pretende proponer un nuevo indicador de calidad ambiental que no ha sido tomado en cuenta hasta el momento y cuya relevancia puede ser significativa como se plantea a continuación.

Los parámetros utilizados para medir la calidad del aire en el DMQ son las concentraciones de contaminantes como el CO, NOx, SOx, y Material Particulado (PM) medidos a través de estaciones de monitoreo del aire ambiente. Sin embargo, en el DMQ nada se ha estudiado respecto de la influencia de estos contaminantes en procesos hidrometeorológicos como lo es la formación de lluvia. Como se ha mencionado anteriormente, es un hecho comprobado científicamente a nivel internacional la influencia de este tipo de contaminantes en los niveles de pH del agua lluvia que tienden a disminuir por

procesos de acidificación que dan lugar a la formación de lluvia ácida, la cual tiene un sin número de efectos nocivos sobretodo para la salud pública. Por otra parte, el agua lluvia en el proceso de precipitación puede “arrastrar” contaminantes suspendidos en la atmósfera y de esta forma incrementar sus niveles de sólidos totales disueltos. Consecuentemente, el análisis de estos parámetros en el agua lluvia constituye una forma alternativa de medir la contaminación atmosférica que no ha sido estudiada hasta el momento.

De este modo, es evidente la estrecha relación que existe entre la contaminación ambiental atmosférica y la calidad del agua lluvia que precipita. Por lo tanto, el análisis de parámetros como pH y sólidos totales en el agua lluvia mediante la utilización de registros históricos de precipitación permitirá definir con claridad esta relación, y aportar con una óptica nueva a la evaluación de la calidad del aire ambiente en el Distrito Metropolitano de Quito.

1.1.2 HIPÓTESIS

Es posible que la contaminación ambiental atmosférica incida en los niveles de pH y concentración de los sólidos totales disueltos del agua lluvia del centro del DMQ con la consecuente afectación a la calidad ambiental.

1.2 OBJETIVOS

1.1.3 OBJETIVO GENERAL

- Determinar la influencia de la contaminación ambiental atmosférica en los niveles de pH y de sólidos totales disueltos del agua lluvia del centro del DMQ.

1.1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Establecer la influencia de los factores meteorológicos en la dispersión de los contaminantes precursores de lluvia ácida en el DMQ.
- Determinar los parámetros necesarios que deben ser analizados en muestras de agua para realizar posteriores estudios sobre los efectos de la acidificación de la lluvia en el DMQ.

1.3 JUSTIFICACION

Es un hecho científico comprobado en el ámbito internacional la marcada influencia que tiene la contaminación ambiental atmosférica en la formación de agua lluvia con niveles de pH bajos (lluvia ácida); y como consecuencia de lo anterior la afectación a la calidad ambiental en los lugares donde dicha lluvia precipita. Por otra parte, la contaminación ambiental atmosférica causada por las emisiones de industrias y de un parque automotor en constante crecimiento (así como también por eventos naturales), tiene una incidencia directa en la calidad del aire que respiran los ciudadanos del Distrito Metropolitano de Quito; sin embargo, se desconoce en que medida la contaminación del aire afecta los niveles de pH y de la concentración de los sólidos totales disueltos del agua lluvia del DMQ por lo cual los resultados de esta investigación constituirán una herramienta importante en la toma de decisiones en lo que respecta a la gestión del recurso aire en la ciudad de Quito.

CAPITULO 2

2.1 REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

2.1.1 LA ATMÓSFERA

La atmósfera terrestre es la capa gaseosa que rodea a la Tierra. Está compuesta por nitrógeno (78.1%) y oxígeno (20.94%), con pequeñas cantidades de argón (0.93%), dióxido de carbono (variable, pero alrededor de 0.035%), vapor de agua, neón (0.00182%), helio (0.000524%), criptón (0.000114%), hidrógeno (0.00005%) y ozono (0.00116%).

Protege la vida de la Tierra absorbiendo en la capa de ozono parte de la radiación solar ultravioleta, reduciendo las diferencias de temperatura entre el día y la noche, y actuando como escudo protector contra los meteoritos. El 75% de la atmósfera se encuentra en los 11 primeros kilómetros de altura desde la superficie planetaria.

2.1.2 CAPAS ATMOSFÉRICAS

La temperatura de la atmósfera terrestre varía con la altitud. La relación entre la altitud y la temperatura es distinta dependiendo de la capa atmosférica considerada:

- Troposfera: 0 - 8/16 km, la temperatura disminuye con la altitud.

Estratosfera: 8/16 - 50 km, la temperatura permanece constante para después aumentar con la altitud.

- Mesosfera: 50 - 80/85 km, la temperatura disminuye con la altitud.
- Termosfera o Ionosfera: 80/85 - 500 km, la temperatura aumenta con la altitud.

Las divisiones entre una capa y otra se denominan respectivamente tropopausa, estratopausa, mesopausa y termopausa.

2.1.2.1 Troposfera

La troposfera es la capa inferior de atmósfera, está comprendida desde la superficie terrestre hasta una altitud de 6 a 18 kilómetros.

En la troposfera se hace posible la vida, ya que se concentran la mayoría de los gases de la atmósfera proporcionando las condiciones necesarias para que pueda desarrollarse la vida. Es la zona más turbulenta de la atmósfera y en ella tienen lugar todos los fenómenos meteorológicos y climáticos. La capa por encima de ella es la estratosfera, llamándose tropopausa a la frontera entre ambas.

2.1.2.2 Estratosfera

Es la capa de la atmósfera, situada encima de la troposfera, que se extiende a unos 11-50 Km. de la superficie terrestre.

En la parte baja de la estratosfera la temperatura es relativamente estable y hay poca humedad.

La estratosfera se extiende desde la tropopausa hasta estratopausa, situada a los 50-60 Km. de altitud. En esta capa la temperatura aumenta con la altitud. Esta relación de la temperatura con la altura es la inversa a la que se encuentra en las capas superior e inferior. Esto es debido principalmente a la absorción de las moléculas de ozono que radiación electromagnética en la región del ultravioleta.

La estratosfera es una región en donde se producen diferentes procesos radioactivos, dinámicos y químicos. La mezcla horizontal de los componentes gaseosos se produce mucho más rápidamente que la mezcla vertical.

2.1.2.3 Mesosfera

La mesosfera, que se extiende entre los 50 y 80 Km. de altura, contiene sólo cerca del 0,1% de la masa total del aire. Es importante por la ionización y las reacciones químicas que ocurren en ella. La baja densidad del aire en la mesosfera determina la formación de turbulencias y ondas atmosféricas que actúan a escalas espaciales y temporales muy grandes.

2.1.2.4 Termosfera

Es una de las capas de la atmósfera terrestre llamada así por las elevadas temperaturas que se alcanzan en ella debido a que los gases están ionizados (por eso también se denomina ionosfera). Si el sol está activo, las temperaturas en la termosfera pueden llegar a 1.500° C; sin embargo, estas elevadas temperaturas no se corresponden con la sensación de calor que tendríamos en la troposfera porque en la termosfera la densidad es mucho más baja. Los gases aparecen ionizados porque esta capa absorbe las radiaciones solares de menor longitud de onda (rayos gamma y rayos X) que son altamente energéticos.

2.1.2.5 Exosfera

La exosfera es la última capa de atmósfera terrestre, por encima de la termosfera y a más de 500 kilómetros de altura, en contacto con el espacio exterior, donde existe prácticamente el vacío. Es la región atmosférica más distante de la superficie terrestre.

Su límite superior se localiza a altitudes entre 600 y 960 Km. e incluso 1000 km. Su límite con el espacio llega en promedio a los 10.000 km. Contiene mucho polvo cósmico que cae sobre la Tierra y que hace aumentar su peso en unas 20.000 toneladas.

2.2 ASPECTOS RELEVANTES DE METEOROLOGÍA

2.2.1 CONCEPTOS DE METEOROLOGÍA

2.2.1.1 Temperatura del aire

Es la magnitud física que mide la velocidad promedio de las moléculas del aire. Se la mide a través de un termómetro expuesto al aire y protegido de la radiación solar. Las unidades de medición de este parámetro son por lo general grados centígrados y décimas de grado.

2.2.1.2 Humedad atmosférica

Se define como humedad atmosférica al contenido de vapor de agua en el aire.

2.2.1.3 Temperatura del punto de rocío

Es la temperatura a la que hay que enfriar una masa de aire para que se sature, a presión y humedad constantes (proceso isobárico).

2.2.1.4 Tensión del vapor

Es la fuerza ejercida por el vapor de agua sobre la superficie de la Tierra independientemente de la ejercida por el resto de los gases que constituyen el aire. Generalmente se mide en Hectopascales por tratarse de presión.

2.2.1.5 Precipitación atmosférica

Hidrometeoro que consiste en la caída de lluvia, llovizna, nieve, granizo, hielo granulado, etc. Desde las nubes a la superficie de la Tierra.

2.2.1.6 Heliofanía

Tiempo de duración del brillo solar. Se mide en horas y minutos de brillo solar.

2.2.1.7 Evaporación

Hidrometeoro que se refiere a la emisión de vapor de agua a la atmósfera a una temperatura inferior al punto de ebullición.

2.2.1.8 Evaporación potencial

Máxima cantidad de vapor que podría ser emitida a la atmósfera disponiendo en todo momento del agua necesaria para evaporar.

2.2.1.9 Viento

Movimiento del aire con respecto a la superficie de la Tierra. Las direcciones se toman de donde procede el viento, y las velocidades se miden en metros por segundo.

2.2.1.10 Nubosidad

Fracción de la bóveda terrestre cubierta por la totalidad de nubes visibles. Este parámetro se lo mide dividiendo a la bóveda celeste en octavos llamados (octas). La nubosidad la estima el observador por observación directa y no utiliza aparatos para su estimación.

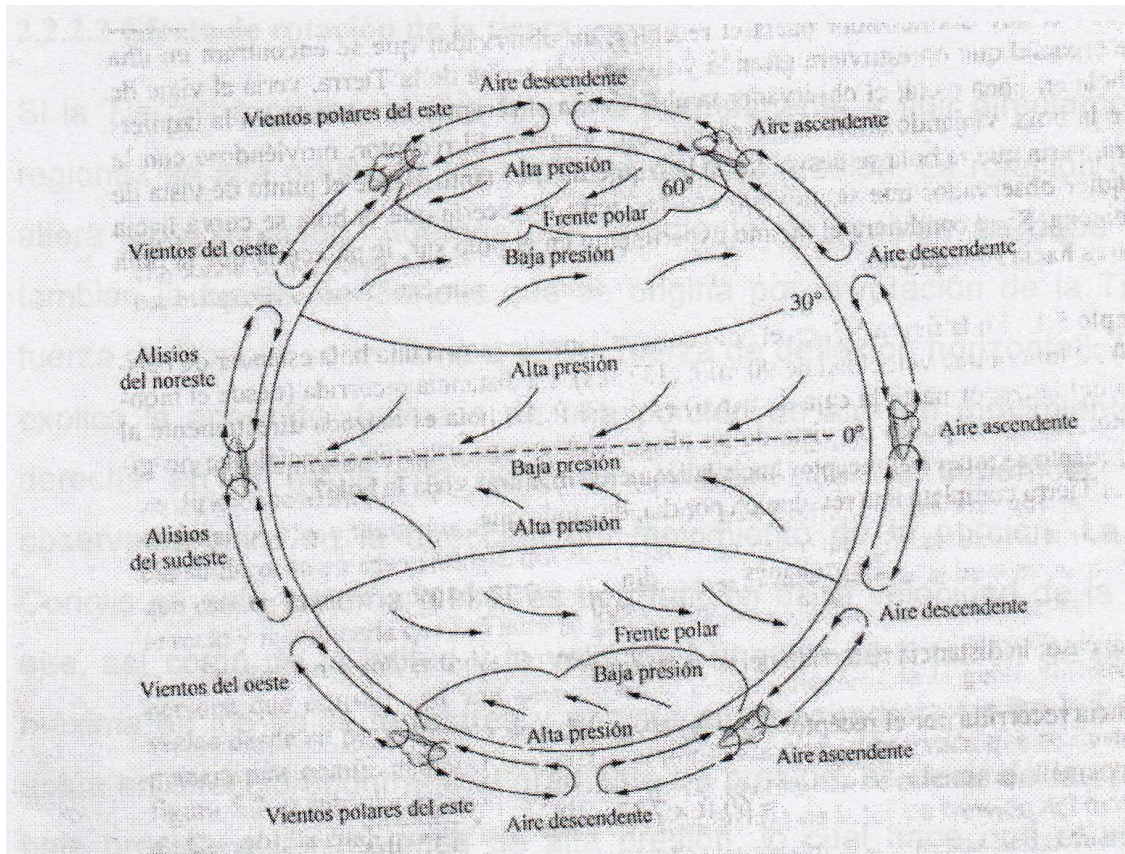
2.2.2 MOVIMIENTO ATMOSFÉRICO HORIZONTAL

El movimiento horizontal de la atmósfera (la componente horizontal de los vientos) es provocado por el calentamiento desigual de la superficie de la Tierra y es modificado por el efecto de rotación de la esta última (fuerza de Coriolis) y por la influencia del terreno y el mar.

2.2.2.1 Calentamiento ecuatorial, enfriamiento polar

Promediado durante un año, el flujo de calor solar a la superficie de la Tierra en el ecuador es 2.4 veces el que se tiene en los polos ⁽¹⁾. Como respuesta a esta diferencia en el calentamiento, la atmósfera se mueve y, al hacerlo, lleva calor de los trópicos hacia los polos. Debido a que la atmósfera es bastante delgada en comparación con su ancho, ese flujo es mecánicamente inestable y se rompe en subceldas. Podría existir cualquier número impar de esas celdas en cada hemisferio; normalmente sobre la Tierra existen tres celdas en cada uno como se muestra en la figura 2-1

Figura 2-1: Circulación del viento debido a gradientes de temperatura.



Fuente: Kenneth Wark; "Contaminación del Aire: Origen y Control"

En el hemisferio norte se ve, a partir de las celdas de circulación cuyos esquemas se muestran en los bordes de la figura, un flujo de sur a norte a gran altitud y uno de norte a sur en la superficie, en las celdas tropical y polar, con los flujos dirigidos en direcciones opuestas, en la celda templada. En el globo existen siete fronteras entre celdas, una en el ecuador, dos en cada hemisferio y dos en los polos. En la frontera en el ecuador y las dos entre las celdas polares y

templadas, el aire sube; en las fronteras entre las celdas tropicales y templadas y en los polos el aire se “hunde”. Las fronteras ascendentes (las fronteras del ecuador y templadas-polares) son regiones de precipitación pluvial superior a la promedio; la mayor parte de los bosques tropicales del mundo se encuentran cerca de las zonas ascendentes templadas-polares. Las fronteras descendentes (los polos y las fronteras tropicales-templadas) son regiones de precipitación pluvial inferior a la promedio, la mayor parte de los grandes desiertos del mundo están ubicados cerca de las zonas descendentes templadas tropicales ⁽¹⁾.

2.2.2.2 Efecto de rotación de la tierra

Si la Tierra no girara, el aire tendería normalmente a fluir directamente de las regiones de alta presión a las regiones de baja presión. La rotación de la Tierra altera esta situación. Además del gradiente de presión se debe considerar también la fuerza de Coriolis que se origina por la rotación de la Tierra. (A la fuerza de Coriolis se le llama a veces fuerza de deflexión horizontal). Esta fuerza explica la aparente deflexión de una porción de aire en movimiento, hacia la derecha en el hemisferio norte, en relación con la superficie, cuando el observador mira en la dirección del movimiento de la porción. La fuerza de Coriolis en este sistema global es una función de la velocidad de la porción de aire, así como de la latitud y la velocidad angular de rotación de la Tierra. Es máxima en los polos terrestres y mínima en el ecuador. La fuerza de Coriolis actúa en dirección contraria al gradiente de presión, es decir de las regiones de baja presión a las regiones de alta presión, lo cual hace que el viento sople (considerando al viento como un vector) de forma perpendicular a la fuerza ejercida por el gradiente de presión y a la fuerza de Coriolis.

2.2.2.3 Influencia de la Tierra y el mar

La superficie de la Tierra se calienta con rapidez del día a la noche y del verano al invierno, debido a que la tierra sólida es mala conductora del calor. La superficie de los lagos y océanos se calienta y enfría con lentitud, en su mayor

parte porque sus capas superficiales son agitadas por los vientos y por corrientes naturales de convección, mezclando de este modo el calor, hacia arriba y hacia abajo. La tierra sólida no es agitada por el viento o por corrientes de convección, de modo que el calor no se puede mezclar hacia arriba y hacia abajo; su temperatura superficial cambia con mayor rapidez que como sucede en las masas de agua. Por tanto, el calentamiento (o enfriamiento) de la capa de aire adyacente al piso sólido es mucho más rápido en comparación con el aire que esta sobre las masas de agua.

2.2.3 MOVIMIENTO VERTICAL EN LA ATMÓSFERA

Cualquier porción de aire que sea menos densa que el aire que la rodea se elevara por acción de un empuje vertical, y cualquier porción que sea más densa que el aire que la rodea se hundirá por la acción de un empuje vertical negativo. La mayor parte de los movimientos en la atmósfera son causados por cambios en la densidad del aire.

2.2.3.1 Cambio de la densidad del aire con la temperatura

La densidad de cualquier parte de la atmósfera se expresa casi con exactitud por la ley de los gases perfectos,

$$\rho = \frac{MP}{RT} \quad (2.1)$$

A cualquier altura y presión, la densidad es determinada por la masa (M) y la temperatura (T). Cabe destacar que la mayor parte del movimiento vertical de la atmósfera es provocado por cambios en la temperatura y por cambios en la humedad.

2.2.3.2 Cambio de la densidad del aire con la presión

La ecuación básica de la estática de fluidos, también conocida como la ecuación barométrica, expresa que

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (2.2)$$

en donde

z = distancia vertical

g = aceleración debido a la gravedad

Esta ecuación es correcta para sólidos, líquidos o gases. La presión en cualquier punto de la atmósfera, de los océanos o del interior de la tierra es la presión necesaria para soportar el peso de todo lo que esta arriba de ese punto. Si en la ecuación anterior se sustituye la densidad por su expresión derivada de los gases perfectos se tiene:

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{gMP}{RT} \quad (2.3)$$

o sea

$$\frac{dP}{P} = -\frac{gM}{RT} dz \quad (2.4)$$

Los cambios en M no son importantes, sin embargo los de temperatura si lo son. Para cualquier porción de aire que se mueve hacia arriba sin mezclarse de manera significativa con el aire que se encuentra alrededor de él, desde el punto de vista termodinámico se observaría un comportamiento adiabático reversible. Un gas perfecto que pasa por un proceso adiabático reversible responde a la y normalmente se expresa como un número positivo.

2.2.3.3 Estabilidad atmosférica

Es necesario conocer el grado de estabilidad de la atmósfera si se desea estimar la capacidad de la misma para dispersar los contaminantes que recibe de las fuentes producidas por el hombre. Se define a una atmósfera estable como aquella que no muestra mucho mezclado o movimiento verticales. De aquí resulta que los contaminantes emitidos cerca de la superficie del suelo tienden a

permanecer ahí. El hecho de que haya mucho mezclado a una escala significativa en la baja atmósfera, depende en primer lugar de: 1) el gradiente de temperatura y 2) la turbulencia mecánica debido a la acción cortante del viento. La posibilidad de que ocurra mezclado térmico se puede determinar por comparación del gradiente actual de temperatura (ambiental) o tasa de cambio con la tasa de cambio adiabática.

2.2.3.4 Inversiones de temperatura

La inversión térmica es un fenómeno meteorológico que se da en las capas bajas de la atmósfera terrestre. Consiste en el aumento de la temperatura con la altitud en una capa de la atmósfera. Como la temperatura suele descender con la altitud hasta el nivel de los 8 a 16 Km. de la troposfera a razón de aproximadamente $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Km.}$, se trata de una característica común de ciertas capas de la atmósfera. Las inversiones térmicas actúan como “tapaderas” que frenan los movimientos ascendentes de la atmósfera. En efecto, el aire no puede elevarse en una zona de inversión, puesto que es más frío y, por tanto, más denso en la zona inferior.

El fenómeno de inversión térmica se presenta cuando en las noches despejadas, el suelo se enfría rápidamente y por consiguiente pierde calor por radiación. El suelo a su vez enfría el aire en contacto con él que se vuelve más frío que el que está en las capas superiores de aire cercanas a él, lo cual provoca que se genere un gradiente positivo de temperatura con la altitud (lo que es un fenómeno contrario al que se presenta normalmente, la temperatura de la troposfera disminuye con la altitud). Esto provoca que la capa de aire caliente quede atrapada entre las 2 capas de aire frío sin poder circular, ya que la presencia de la capa de aire frío cerca del suelo le da gran estabilidad (con un mayor peso) a la atmósfera porque prácticamente no hay convección térmica, ni

fenómenos de transporte y difusión de gases (aire que no puede ascender) y esto hace que disminuya la velocidad de mezclado vertical entre la región que hay entre las 2 capas frías de aire.

La inversión térmica es un fenómeno peligroso para la vida cuando hay contaminación porque al comprimir la capa de aire frío a los contaminantes contra el suelo la concentración de los gases tóxicos puede llegar hasta equivaler a 14 veces más. (Cuando existen condiciones de inversión térmica y se emiten contaminantes al aire se acumulan (aumenta su concentración), debido a que permanecen retenidos, provocando una contaminación atmosférica de consecuencias graves para la salud de los seres vivos. La concentración de los gases tóxicos puede llegar a ser hasta 10 veces más alta que cuando no existe inversión térmica.)

2.2.4 VIENTOS

2.2.4.1 Perfil de velocidad del viento

El movimiento del aire cerca de la superficie del terreno está retrasado por los efectos de la fricción proporcionales a la rugosidad de la superficie. Por tanto, la naturaleza del suelo, la localización y densidad de los árboles, la situación y tamaño de los lagos, ríos, colinas y edificios produce diferentes gradientes de velocidad del viento en la dirección vertical. La capa de aire que está influenciada por la fricción se extiende desde algunos cientos de metros hasta varios kilómetros por encima de la capa de la superficie del suelo. La altura de esta capa es mayor en el caso de las condiciones inestables que en el caso de las condiciones estables. De este modo, los contaminantes se dispersarán sobre una mayor distancia vertical en condiciones atmosféricas inestables. Esto lleva a una reducción general de la concentración general de los contaminantes en una determinada región en la dirección del viento que viene de la fuente de contaminación.

Debido al cambio apreciable de la velocidad del viento con la altura para cualquier valor de la velocidad se deberá citar la elevación a la que fue medida. La altura internacional convenida para las mediciones de viento superficial es de 10 m.

Es necesario frecuentemente conocer la velocidad del viento a una altura diferente a la de la norma. Se ha realizado numerosos esfuerzos a fin de desarrollar expresiones analíticas adecuadas que relacionen la velocidad del viento con la altura. Debido a la complejidad de los fenómenos, no se dispone en este momento de ninguna expresión satisfactoria. No obstante se ha observado que la ley de Deacon es de utilidad para capas de hasta cientos de metros de altitud. La expresión es la siguiente:

$$\frac{u}{u_1} = \left(\frac{z}{z_1} \right)^p \quad (2.7)$$

Donde u es la velocidad del viento a la altura z , u_1 es la velocidad del viento a la altura z_1 y p es un exponente positivo que puede tomar valores entre 0 y 1. El valor de p esta relacionado con el grado de estabilidad de la atmósfera; de esta forma, se ha encontrado ser razonablemente adecuado el uso de un valor de p de 0.40 para áreas urbanizadas, 0.28 para áreas densamente boscosas, ciudades y suburbios, y 0.16 para terrenos llanos y abiertos, lagos y mares ⁽²⁾.

2.2.5 ASPECTOS GENERALES DEL COMPORTAMIENTO METEOROLÓGICO EN EL DQM

La ciudad de Quito se encuentra rodeada por grandes elevaciones que estabilizan los efectos de la temperatura. La temperatura media anual en Quito es de 14.6 °C, con muy poca variación media mensual pero con una fuerte variación durante el día, con valores que oscilan entre 9.9 °C y 21.5 °C, y que pueden llegar desde 4 °C hasta 25 °C, principalmente en los meses de agosto y septiembre. Por otra parte, la precipitación media multianual es de 1126.7 mm.

con dos estaciones lluviosas: una que va desde febrero a mayo y otra que va de octubre a noviembre. Por su parte, junio, julio y agosto, son los meses de menor precipitación, menor número de días con lluvia y de mayor insolación. El promedio mensual de precipitación va de 80 a 180 mm, lo cual corresponde al 70% de las observaciones en el periodo 2000-2006. El potencial de evapotranspiración es de 1178 mm.

Asociado con esto se producen inversiones térmicas, ocasionadas principalmente por el enfriamiento de la tierra durante las noches de cielo despejado, lo que favorece la fuga de calor del suelo, y de las capas atmosféricas adyacentes al mismo, hacia capas más altas de la troposfera, principalmente en el verano (julio, agosto y septiembre) y en el veranillo de "El Niño" (que se produce entre noviembre y diciembre). Estas inversiones provocan estabilidad atmosférica de tipo temporal, que favorecen el estancamiento de los contaminantes, pero al disiparse, normalmente antes del medio día, inicia la dispersión de los mismos, siempre y cuando no haya otra fuerza que los haga permanecer pegados al suelo.

Las velocidades del viento varían entre 1 y 2 m/s, pudiendo alcanzar valores de 2 y 4 m/s entre las 13h0 y 16h00. Durante el mes de agosto los promedios diarios se incrementan y varían entre 2 y 4 m/s, pudiendo alcanzar valores de hasta 8 m/s desde las 13h00 hasta las 16h00. Sin embargo, no se puede hablar de direcciones dominantes o velocidades promedio debido a que estos parámetros meteorológicos son muy variables en Quito y dependen de la estación y la zona en la que se los midan.

Cabe destacar que existen microclimas urbanos diferentes dentro de la misma ciudad de Quito y particularidades notables en cuanto al clima en todo el DMQ. Esto se debe principalmente a las condiciones topográficas de la ciudad, que en general se establecen como desfavorables para la dispersión de los contaminantes. La topografía favorece el "atrapamiento" de los contaminantes, el

régimen de los vientos poco contribuye a la circulación del aire sobretodo en el centro histórico, y las inversiones térmicas son capaces de bloquear el aire a nivel del suelo.

2.3 EVOLUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

2.3.1 INFRAESTRUCTURA IMPLEMENTADA EN EL DMQ PARA LA MEDICIÓN DE LOS CONTAMINANTES DEL AIRE

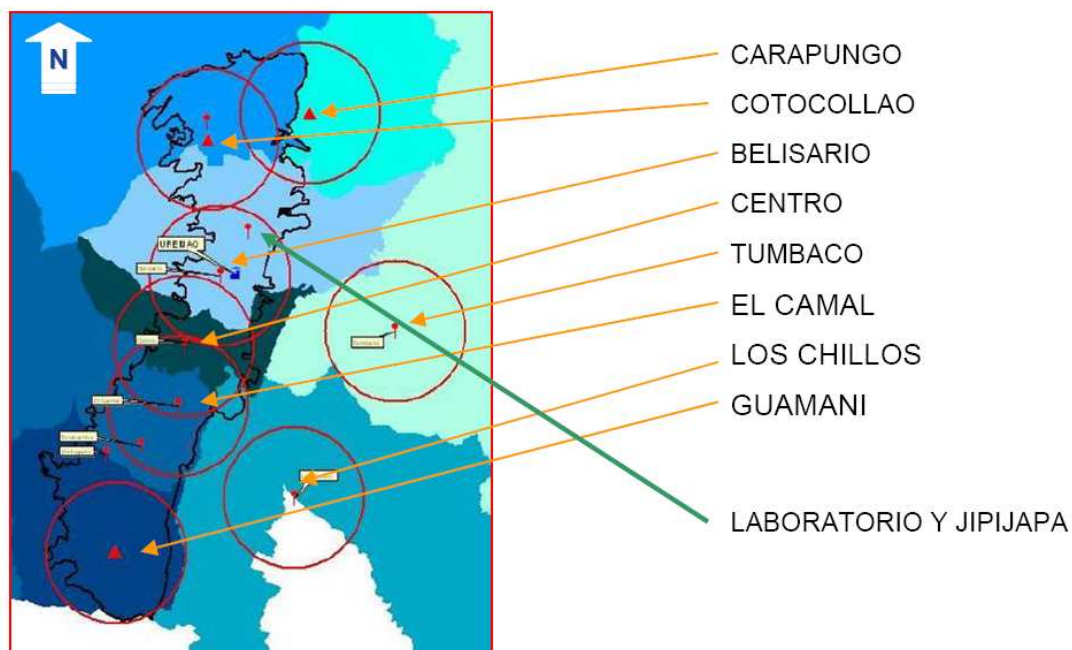
Dentro de sus estrategias de gestión CORPAIRE implementó la REMMAQ (Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito) lo cual ha permitido contar con información objetiva y confiable respecto de la contaminación del aire desde el año 2003. La REMMAQ cuenta con varios tipos de redes para evaluar la contaminación ambiental atmosférica. De interés para este estudio se pueden citar a la red automática para la determinación de la calidad del aire (RAUTO); la red de monitoreo pasivo (REMPA); y la red de depósito (REDEP) ⁽³⁾.

La RAUTO tiene las siguientes características:

- Se encuentra constituida por ocho estaciones en línea, mas una adicional de respaldo.
- Estas estaciones se encuentran equipadas con analizadores automáticos para gases (dióxido de azufre, SO₂; monóxido de carbono, CO; y, óxidos de nitrógeno, NOX), y material particulado (PM 2.5), que tienen capacidad para operar de manera permanente generando promedios cada 10 minutos.
- La cobertura espacial de la red cubre las ocho administraciones zonales del DQM y la ubicación de las estaciones de monitoreo se fundamenta en guías y principios utilizados internacionalmente, a partir de los datos de densidad poblacional y topografía locales ⁽³⁾.

La figura 2-2 presenta información respecto de la ubicación de los sitios de muestreo y los parámetros que miden cada una de las estaciones:

Figura 2-2: Ubicación de los sitios de muestreo de la calidad de aire en el DMQ



Fuente: CORPAIRE

La REMPA permite realizar un muestreo simultáneo en 43 puntos del DQM para recabar información promedio quincenal que posibilita entender de mejor manera la distribución espacial de la contaminación, especialmente en las zonas sometidas a alto tráfico vehicular. Los contaminantes que se analizan son NO₂ y O₃. Se encuentran en proceso de incorporación otros parámetros como SO₂ y compuestos orgánicos volátiles (COVS) ⁽³⁾.

La REDEP se encuentra colocada en 34 puntos del DQM y permite conocer la concentración de material particulado sedimentable o polvo, otro contaminante identificado en la normativa nacional. Los colectores en los que se recoge la

muestra son expuestos durante treinta días y luego de esta exposición, se realizan análisis gravimétricos (peso) y químicos de sedimentos solubles, insolubles, pH, aniones y cationes ⁽³⁾.

En la siguiente tabla se resume las técnicas de medición usadas para medir la concentración de los diferentes contaminantes:

Tabla 2-1: Contaminantes del aire y técnicas de medición utilizadas en la Red Automática de Monitoreo de CORPAIRE

PARAMETRO	TECNICA DE MEDICION
Dióxido de azufre (SO ₂)	Fluorescencia por pulsos de luz ultravioleta (Método equivalente EPA NO. EQSA-0486-060)
Monóxido de carbono (CO)	Absorción infrarroja no dispersiva (Método de referencia EPA No. RFCA - 0981--054)
Ozono (O ₃)	Absorción de luz ultravioleta (Método equivalente EPA No. EQOA-0880-047)
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	Quimiluminiscencia (Método de referencia No. RFNA-1289-074)
Material Particulado (PM _{2.5})	Atenuación de rayos beta (método equivalente para PM10 EPA No. EQPM-1102-150)

Fuente: CORPAIRE

2.3.2 NORMATIVA LEGAL

2.3.2.1 Límites máximos permitidos según la Norma de Calidad del Aire Ambiente

La referencia obligatoria para evaluar el estado del recurso aire constituye la Norma de calidad del Aire Ambiente, publicada como parte constituyente del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (Libro VI De la Calidad Ambiental, Anexo 4), vigente desde marzo de 2003. Un resumen de esta norma se presenta en la tabla 2-2 donde constan los contaminantes identificados como tales, los límites máximos permitidos en concordancia con los promedios de medición y los criterios de excedencia anual permitidos.

Tabla 2-2: Resumen de la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire Ambiente

CONTAMINANTE	VALOR	UNIDAD	PROMEDIO DE MEDICION	EXCEDENCIA
Partículas Sedimentables	1	mg/(cm ² x30d)	Acumulado en 30 días	No se permite
Material Particulado Sedimentable (PM10)	50	µg/m ³	Promedio aritmético anual	No se permite
	150	µg/m ³	Promedio aritmético de 24 horas consecutivas	2 veces por año
Material particulado fino (PM2.5)	15	µg/m ³	Promedio aritmético anual	No se permite
	65	µg/m ³	Promedio aritmético de 24 horas consecutivas	2 veces por año
Dióxido de azufre (SO ₂)	80	µg/m ³	Promedio aritmético anual	No se permite
	350	µg/m ³	Promedio aritmético de 24 horas consecutivas	2 veces por año
Monóxido de Carbono (CO)	10000	µg/m ³	Promedio aritmético móvil de 8 horas consecutivas	1 vez por año
	40000	µg/m ³	Media aritmética horaria	1 vez por año
Ozono (O ₃)	120	µg/m ³	Promedio aritmético móvil de 8 horas consecutivas	1 vez por año
	160	µg/m ³	Media aritmética horaria	1 vez por año
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	100	µg/m ³	Media aritmética anual	No se permite
	150	µg/m ³	Promedio aritmético de 24 horas consecutivas	2 veces por año

Fuente: Ministerio del Ambiente 2003.
 Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria. Quito, Ecuador.

2.3.2.3 Límites máximos permitidos según la ordenanza 146 del DMQ

Tabla 2-3: Valores máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión

CONTAMINANTE EMITIDO	COMBUSTIBLE UTILIZADO	UNIDADES	VALORES MAXIMOS
Partículas	Sólido	mg/Nm ³	200
	Bunker	mg/Nm ³	200
	Diesel	mg/Nm ³	150
	Gaseoso	No aplicable	No aplicable
Óxidos de Nitrógeno	Sólido	mg/Nm ³	900
	Bunker	mg/Nm ³	700
	Diesel	mg/Nm ³	500
	Gaseoso	mg/Nm ³	140
Dióxido de Azufre	Sólido	mg/Nm ³	No aplicable
	Bunker	mg/Nm ³	1650
	Diesel	mg/Nm ³	1650
	Gaseoso	No aplicable	No aplicable
Monóxido de Carbono	Sólido	mg/Nm ³	1800
	Bunker	mg/Nm ³	300
	Diesel	mg/Nm ³	250
	Gaseoso	mg/Nm ³	100

Fuente: Ordenanza 146 del Distrito metropolitano de Quito

Tabla 2-4: Límites máximos permisibles para emisiones gaseosas de incineradores de desechos peligrosos

CONTAMINANTE	UNIDAD	LIMITE DE EMISION
CO	(mg/m ³)	80
HCL	(mg/m ³)	50
NOx	(mg/m ³)	560
SO2	(mg/m ³)	100
Partículas	(mg/m ³)	50
Arsénico, Cobalto, Selenio, Níquel, Telurio	(mg/m ³)	2
Cadmio y Talio	(mg/m ³)	0.1
Plomo, Antimonio, Cromo Total, Platino, Cobre, Vanadio, Zinc, Estaño, Manganeso, Paladio.	(mg/m ³)	3
Mercurio	(mg/m ³)	0.1
Dioxinas y Furanos	(mg/m ³)	10

Fuente: Ordenanza 146 del Distrito metropolitano de Quito

Tabla 2-5: Límites máximos permisibles de emisiones para generadores eléctricos

CONTAMINANTE	UNIDAD	LIMITE DE EMISION
Partículas	mg/m ³	150
Óxidos de Nitrógeno	mg/m ³	2000
Dióxido de Azufre	mg/m ³	400
Monóxido de Carbono	mg/m ³	1500

Fuente: Ordenanza 146 del Distrito metropolitano de Quito

Cabe señalar que si bien existen tanto en el ámbito nacional como local normas técnicas que regulan las emisiones de óxidos de nitrógeno y de azufre, en ambos casos los límites fueron establecidos de acuerdo a lo que recomienda la Organización Panamericana de la Salud (OPS) de acuerdo a los estudios realizados respecto de la afectación directa de estos contaminantes a la salud pública, y de acuerdo a consideraciones técnico-económicas de las industrias. Sin embargo, la legislación nacional no reconoce a estos compuestos como precursores de la “lluvia ácida” debido entre otros factores a la falta de estudios sobre este tema a escala nacional.

2.3.2.3 Normativa referente a calidad del agua

Por otra parte, para analizar la calidad del agua lluvia debemos tener como referencia lo que dicta el Texto Unificado de Legislación Secundaria en su Libro VI, en lo referente a límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico que solo requieren desinfección. En la tabla 2-6 se muestran los valores de los parámetros más importantes para este estudio:

Tabla 2-6: Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico que solo requieren desinfección

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite Máximo Permisible
Potencial Hidrógeno	pH		6-9
Sólidos Totales Disueltos		mg/l	500

Fuente: Ministerio del Ambiente 2003.
 Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria. Quito, Ecuador.

2.3.3 RESULTADOS DE LOS MONITOREOS DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL DMQ

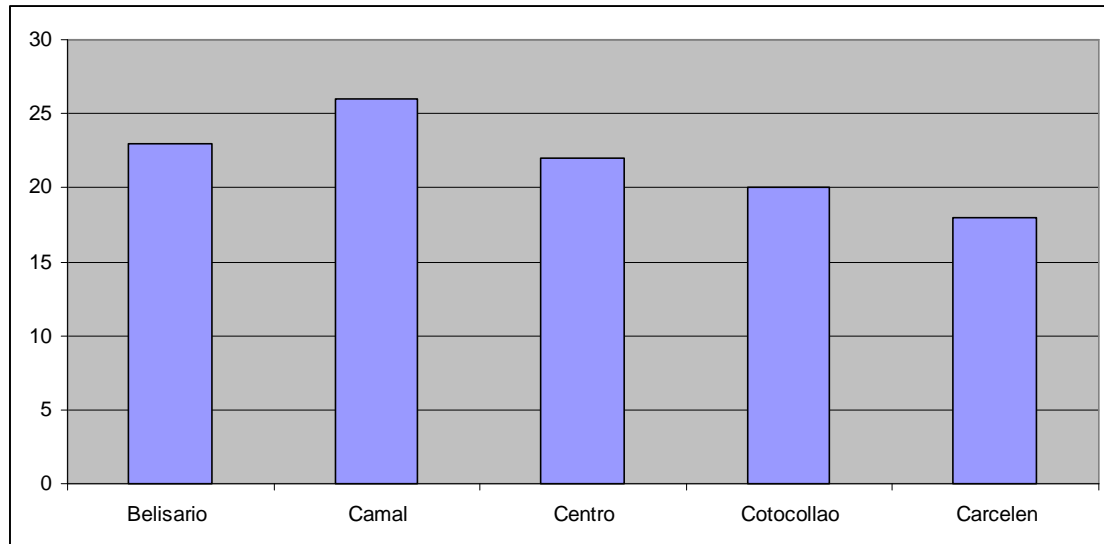
Las siguientes tablas y figuras describen la evolución de la contaminación ambiental atmosférica en el DQM generada por los compuestos PM_{2.5}, NO₂, y SO₂; los mismos que son de interés en el presente estudio por cuanto el material particulado fino (PM_{2.5}) influye en los niveles de sólidos totales disueltos del agua lluvia, y tanto el dióxido de nitrógeno (NO₂) como el dióxido de azufre (SO₂) son agentes precursores de la lluvia ácida como se señaló en el capítulo 1.

Tabla 2-7: Indicadores de calidad del aire, PM_{2.5} (en µg/m³) en 24 horas

ESTACION	CARAPUNGO		BELISARIO		EL CAMAL		CENTRO	
	2005	2006	2005	2006	2005	2006	2005	2006
MAXIMO	91.7	41.5	48.1	44.9	100.8	76.2	67.2	54.7
#Dias>=50 ug/m3	2.0	0.0	0.0	0.0	24.0	7.0	3.0	1.0
#Dias>=65 ug/m3	2.0	0.0	0.0	0.0	4.0	1.0	1.0	0.0
Percentil 90	29.2	23.4	32.0	28.4	41.2	34.1	32.5	28.7
Percentil 75	24.2	19.4	24.9	24.7	32.0	27.8	25.1	23.9
Percentil 50	18.5	15.4	18.6	20.4	23.0	22.0	17.6	19.2
Percentil 25	14.1	12.0	13.7	15.7	16.8	16.7	12.1	14.3
Percentil 10	11.4	9.4	9.2	10.3	13.2	11.6	9.3	10.3
Promedio anual	19.7	16.1	19.8	20.1	25.5	22.8	19.6	19.5

Fuente: CORPAIRE

Figura 1-3: Concentraciones promedio anuales de material particulado fino (PM_{2.5}) en µg/ m³



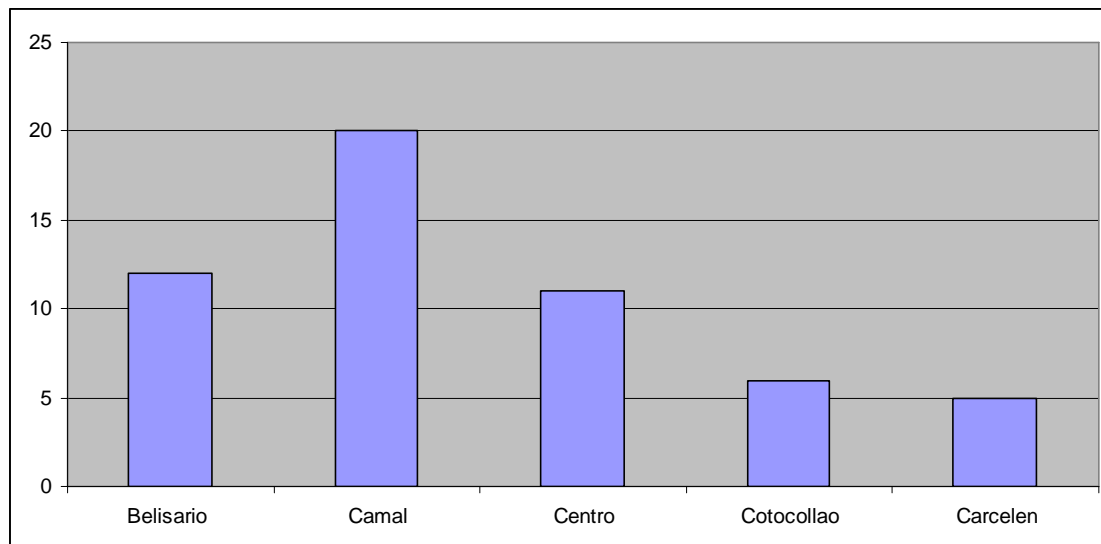
Fuente: CORPAIRE

Tabla 2-8: Indicadores de Calidad del Aire, SO₂ (en µg/ m³) en 24 horas

ESTACION	COTOCOLLAO		CARAPUNGO		BELISARIO		EL CAMAL		CENTRO	
	2005	2006	2005	2006	2005	2006	2005	2006	2005	2006
MAXIMO	65.9	21.5	86.0	14.7	89.8	34.6	115.9	78.5	95.7	30.7
#Dias>=50 ug/m3	3.0	0.0	2.0	0.0	7.0	0.0	37.0	14.0	2.0	0.0
#Dias>=350 ug/m3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Percentil 90	13.6	8.7	18.9	8.3	38.5	21.2	40.8	28.8	19.5	15.5
Percentil 75	10.2	6.7	12.1	6.4	26.6	14.5	26.3	20.8	14.6	12.2
Percentil 50	7.6	5.2	7.6	4.4	17.8	9.8	16.9	13.4	10.1	8.8
Percentil 25	5.3	3.9	4.7	2.9	12.1	7.0	10.8	8.6	6.5	6.3
Percentil 10	3.4	2.8	2.9	2.0	8.2	5.0	8.0	6.3	3.9	4.9
Promedio anual	8.6	5.6	9.6	4.8	20.6	11.4	21.7	16.2	11.3	9.7

Fuente: CORPAIRE

Figura 2-4: Concentraciones promedio anuales de dióxido de azufre (SO₂) en µg/ m³



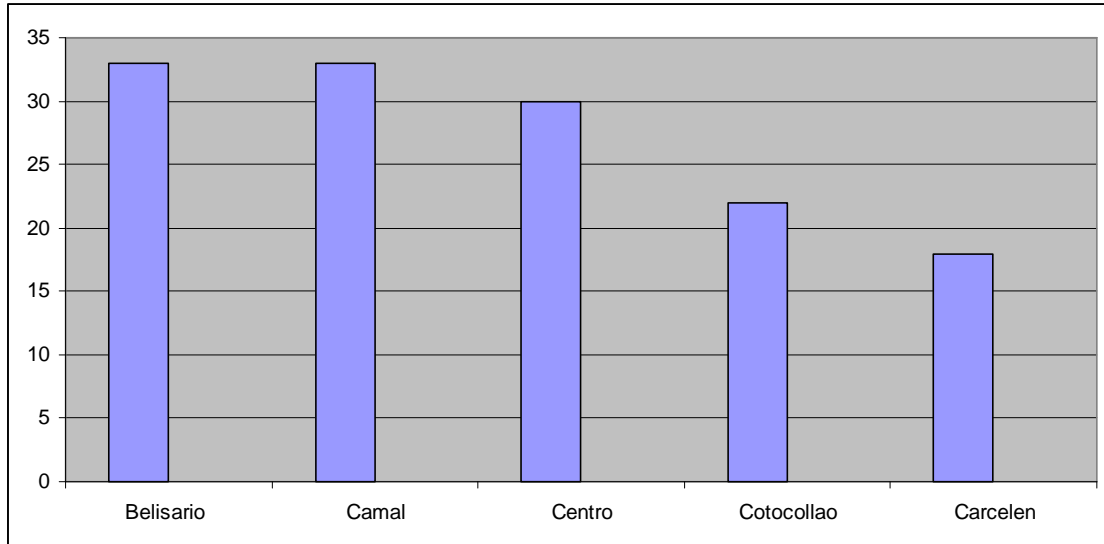
Fuente: CORPAIRE

Tabla 2-9: Indicadores de calidad del aire, NO₂ (µg/ m³) en 24 horas

ESTACION	COTOCOLLAO		CARAPUNGO		BELISARIO		EL CAMAL		CENTRO	
	2005	2006	2005	2006	2005	2006	2005	2006	2005	2006
MAXIMO	100.4	112.2	214.7	70.8	175.7	116.5	172.2	114.3	116.2	113.3
#Dias>=200 ug/m3	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Percentil 90	36.5	36.7	35.7	30.6	56.1	51.3	56.1	50.8	49.1	47.0
Percentil 75	25.5	27.2	23.3	19.9	41.4	40.1	41.8	39.9	36.5	37.0
Percentil 50	16.6	17.6	12.4	10.8	28.8	29.4	29.5	29.5	25.1	26.8
Percentil 25	9.6	10.4	6.7	5.9	18.6	20.1	19.2	19.9	15.5	17.3
Percentil 10	5.9	6.9	3.8	3.4	10.5	12.1	11.6	12.6	8.7	10.2
Promedio anual	19.3	20.0	16.8	14.2	31.8	31.0	32.2	30.9	27.5	28.2

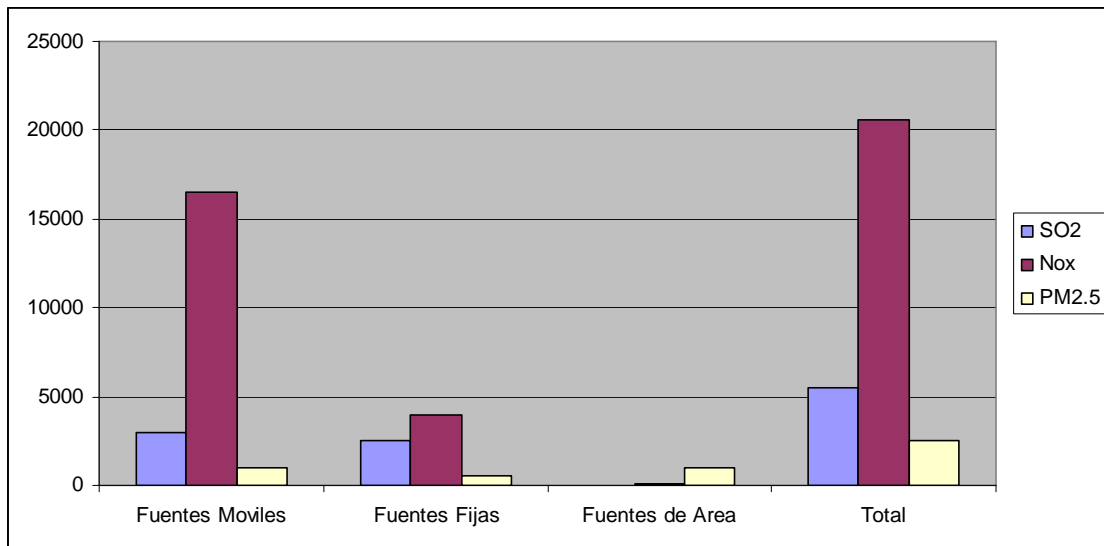
Fuente: CORPAIRE

Figura 2-5: Concentraciones promedio anuales de dióxido de nitrógeno (NO₂) en µg/ m³



Fuente: CORPAIRE

Figura 2-6: Emisiones anuales en el DMQ 2003 (toneladas/año)



Fuente: CORPAIRE

A partir de los datos presentados y de información adicional proporcionada por CORPAIRE, se puede señalar para cada contaminante lo siguiente:

Material Particulado Fino PM2.5

- De las 2409 toneladas de material particulado fino producido en el DMQ en el año 2003, el 46% es producido por fuentes móviles, principalmente a diesel (38%). Las fuentes de área aportan con el 40%, generado, al igual que el PM10, por las canteras, resuspensión de vías, incendios y quemas y erosión de suelo. Finalmente, las fuentes fijas generan el 14%, principalmente en procesos industriales de producción de agregados, cemento y pinturas (8%) ⁽⁴⁾.
- Los datos generados por la REMMAQ muestran que el principal problema del aire en Quito lo constituye el material particulado fino (PM2.5), ya que los demás contaminantes no presentan valores que excedan los límites máximos permitidos (durante el año 2006).
- De acuerdo con el inventario de emisiones del DMQ del año 2003, el PM2.5, proviene del tráfico vehicular (45.4% de las 2409 toneladas anuales), principalmente de camiones y buses que queman diesel.
- Las concentraciones horarias de un día típico presentan dos picos: de 6h00 a 9h00 y de 18h00 a 22h00. Los promedios más altos corresponden a la estación El Camal.
- Los valores máximos presentan una disminución en todas las estaciones de monitoreo.
- La concentración máxima permitida por la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire, 65 µg/m³ promedio en 24 horas, es superada 4 días en el 2005, y un día (el 1 de enero) en el 2006. Adicionalmente, la concentración promedio anual 15 µg/m³, es superada en el 2005 y en el 2006 en todas las estaciones.

Dióxido de Azufre

- Las emisiones de SO₂ están dominadas por el tráfico vehicular y de fuentes fijas. En promedio se emiten 18.7 toneladas diarias, 40% de las cuales se producen en el Valle de los Chillos (sitio de emplazamiento de las principales generadoras termoeléctricas) y otro 40% dentro del límite urbano del DQM ⁽⁴⁾.
- En el 2003 se generaron 6009 toneladas anuales, el 56% de las cuales tuvieron su origen en fuentes móviles, principalmente a diesel (40%); las fuentes fijas contribuyeron con el 44%, la mayor parte de lo cual (25.7%) corresponde a las centrales de generación.
- El comportamiento típico diario presenta un pico entre las 5h00 y 7h00, para la estación el Camal, y entre las 6h00 y las 8h00, para el resto de las estaciones. Los promedios más altos corresponden a la estación El Camal.
- Las concentraciones típicas, promedio anual, del 2006, son 33.5% menores que las del 2005. Por su parte, las concentraciones altas, percentil 90, presentan una disminución del 37%.
- El límite máximo (en 24 horas) de la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire, 350 µg/m³, no fue superado en ninguna estación.

Óxidos de Nitrógeno

- Las emisiones de NO_x están dominadas por la distribución del tráfico vehicular y las fuentes fijas. El 40% de las emisiones se producen dentro de los límites del DQM y 17% en Guangopolo, sitio de emplazamiento de las centrales termoeléctricas ⁽⁴⁾.
- Al igual que el SO₂, la distribución mensual tiene un pico en enero y otro en octubre, marcados por el incremento de la actividad de las generadoras termoeléctricas.

- En el 2003 se generaron 21699 toneladas, 80% de las cuales tuvieron su origen en fuentes móviles principalmente buses y pesados (42%) y particulares livianos, taxis y camionetas (35%). Otra fuente significativa son las centrales termoeléctricas (17%).
- En el DMQ existen 277 establecimientos industriales y de servicios con 610 fuentes fijas de combustión. De estos, 27 establecimientos emiten más de 5 toneladas al año y en conjunto representan el 96% de las emisiones de NOx de las fuentes fijas. En este grupo, las centrales termoeléctricas: Termopichincha Guangopolo, Gualberto Hernández y Luluncoto (ambas de la Empresa Eléctrica Quito S.A.), representan más del 90% de las emisiones de NOx.
- Las concentraciones horarias de un día típico presentan dos picos: de 6h00 a 10h00 y de 18h00 a 21h00. Los promedios más altos corresponden a las estaciones Belisario y El Camal.
- Las concentraciones altas y típicas disminuyen, en el 10.8% y 7.3%, respectivamente, en tres estaciones, Belisario, Carapungo y el Camal. En dos estaciones, Cotocollao y Centro, las concentraciones típicas aumentan.
- La concentración máxima permitida por la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire, 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas, no ha sido superada ni en el 2005 ni en 2006. Tampoco la concentración promedio anual de dicha Norma, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ha sido superada ni en el 2005 ni el 2006.
- La mayor concentración de NO₂ (sedimentable) se encuentra localizado cerca a las estaciones del centro de la ciudad. De acuerdo al mapa de distribución espacial de este contaminante, su concentración en esta zona representa del 80 al 100% de las observaciones en toda la ciudad.

2.4 INFLUENCIA DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL ATMOSFÉRICA EN LOS NIVELES DE pH DEL AGUA LLUVIA

2.4.1 INFORMACIÓN BÁSICA

La "lluvia ácida" es un término amplio usado para describir varias maneras en que los ácidos se desprenden de la atmósfera. Un término más preciso es la deposición ácida, la cual tiene dos partes: húmeda y seca. La deposición húmeda se refiere a lluvia, niebla, y nieve ácida. A medida que esta agua ácida fluye por encima y a través de la tierra, afecta a una variedad de plantas y animales. Cuan fuerte son los efectos depende de muchos factores, incluyendo qué tan ácida es el agua, la química y la capacidad de amortiguación del suelo envuelto, y los tipos de peces, árboles, y seres vivientes que dependen del agua ⁽⁵⁾.

La deposición seca se refiere a los gases y partículas ácidas. Cerca de la mitad de la acidez en la atmósfera cae de nuevo a la tierra a través de la deposición seca. El viento sopla estos gases y partículas hacia encima de edificios, automóviles, casas, y árboles. Los gases y partículas secas depositados pueden también ser lavados de los árboles y otras superficies por las tormentas de lluvia. Cuando eso sucede, las aguas de superficie que se vierten en corrientes como resultado de la lluvia agregan ácidos provenientes de los gases y las partículas secas depositadas a la lluvia ácida, haciendo la combinación más ácida que si fuese la lluvia por sí sola ⁽⁵⁾.

Los vientos predominantes soplan los compuestos que causan ambas deposiciones ácidas, la húmeda y la seca, a través de las fronteras estatales y nacionales, y a veces a cientos de millas de distancia ⁽⁵⁾.

El agua lluvia en condiciones normales es ligeramente ácida a causa de la presencia de CO₂ en la atmósfera que es convertido en ácido carbónico debido a su interacción química con el vapor de agua. Sin embargo, cuando el valor del agua lluvia es menor a 5.6 se considera que la misma es "lluvia ácida" ⁽⁶⁾.

Entre los efectos de la lluvia ácida se pueden mencionar la acidificación de lagos y ríos; el deterioro de los bosques y de la calidad de sus suelos; por otra parte, la lluvia ácida acelera el deterioro de edificios, monumentos, esculturas; entre otros, lo cual se traduce en la pérdida de patrimonio cultural. Finalmente, cabe señalar los efectos a la salud pública pues muchos científicos han encontrado evidencia de enfermedades como asma y bronquitis asociadas a la lluvia ácida ⁽⁷⁾.

2.4.2 ANTECEDENTES

La lluvia ácida comenzó a ser reconocida a mediados del siglo 19, cuando algunas personas notaron que bosques influenciados por los vientos provenientes de grandes zonas industriales paulatinamente mostraban signos de deterioro. El termino “lluvia ácida” fue creado por Robert Angus Smith (científico Inglés) en 1872. Smith observó que la precipitación acida podía causar daño en plantas y animales ⁽⁸⁾.

La lluvia ácida no fue considerada un problema ambiental serio hasta 1970. Durante esa década, los científicos observaron el incremento de la acidez en algunos lagos y ríos ⁽⁸⁾. Al mismo tiempo, extensas investigaciones a cerca del transporte de contaminantes (como el dióxido de azufre) en la atmósfera, indicaban la posibilidad de que los mismos pudiesen recorrer grandes distancias desde su punto de emisión. Por otra parte, muchas plantas de generación de energía utilizan carbón con concentraciones ligeramente elevadas de azufre; ciertas investigaciones determinaron que el dióxido de azufre emitido en plantas como estas ubicadas en los Estados Unidos, por efecto de los patrones del viento, se dirigen al noreste de ese país ⁽⁸⁾. Cuando se determinó que este problema no es solo de carácter local sino más bien regional (e incluso internacional) muchos gobiernos adoptaron medidas al respecto.

En 1980, el Congreso de los Estados Unidos pasó una ley llamada “Acid Deposition Act.” ⁽⁴⁾. Esta ley estableció un programa de investigación sobre este

fenómeno que en principio duró 10 años y que fue dirigido por una agencia creada para el efecto llamada “Nacional Acidic Precipitation Assessment Program (NAPAP)”. Esta agencia estableció redes de monitoreo para determinar la acidez de la lluvia y de la deposición seca con el fin de determinar tendencias a largo plazo ⁽⁸⁾. Por otra parte, el programa también determinó los efectos de la lluvia ácida en los ecosistemas, en los edificios, monumentos y materiales de construcción.

En 1991, NAPAP entregó su primer informe respecto de la lluvia ácida en los Estados Unidos. El informe destacó que 5% de los lagos de la zona de Nueva Inglaterra eran ácidos, siendo la concentración de sulfatos el problema más común ⁽⁸⁾. Posteriores reportes al Congreso de Estados Unidos señalaron cambios químicos en el suelo y en los ecosistemas acuáticos, saturación de nitrógeno, el decrecimiento de las cantidades de nutrientes en el suelo, y el deterioro de monumentos históricos ⁽⁸⁾. A raíz de este informe, el Congreso de los Estados Unidos introdujo enmiendas al Título IV de su ley “Clean Air Act”, con el fin de establecer un programa de control de las emisiones de óxidos de azufre y de nitrógeno con resultados positivos en los siguientes 10 años (8). Similares esfuerzos por estudiar el fenómeno fueron emprendidos también en Canadá (1982).

En nuestro país la Corporación para el Mejoramiento del Aire en Quito (CORPAIRE) tiene instalado desde el año 2005 una red de depósito en 34 puntos distribuidos en la ciudad de Quito para evaluar (entre otros parámetros) el pH del agua que se recolecta en cada uno de estos puntos ⁽³⁾. Si bien este esfuerzo constituye un primer paso en lo que respecta al estudio de la lluvia ácida en nuestro país, la metodología usada no es la más apropiada por cuanto en cada uno de estos puntos se recolecta el agua durante 30 días previo al análisis lo cual no garantiza resultados confiables.

2.4.3 FORMACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA

Los científicos descubrieron, y han confirmado, que el dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) son los contaminantes precursores de la lluvia ácida.

El azufre es un elemento traza que se encuentra en el carbón y en el petróleo (y sus derivados). Cuando el azufre que se encuentra en estos compuestos es combustionado en plantas eléctricas, o calderos industriales, el mismo reacciona con el oxígeno para producir dióxido de azufre. Debido a que el dióxido de azufre no reacciona con la mayoría de los compuestos químicos que se encuentran en la atmósfera, por acción del viento puede transportarse a grandes distancias ⁽¹⁰⁾. Eventualmente, si el dióxido de azufre encuentra ozono o peróxido de hidrógeno en la atmósfera puede reaccionar y convertirse en trióxido de azufre (SO_3). El trióxido de azufre al disolverse en agua puede formar ácido sulfúrico.

Por otra parte, el nitrógeno conforma el 78% de la composición de la atmósfera. Cuando se combustiona a altas temperaturas (en calderos o cámaras de combustión interna) se combina con el oxígeno de la atmósfera para formar óxido y dióxido de nitrógeno, NO y NO_2 respectivamente. Estos compuestos pueden disolverse en agua para formar soluciones débiles de ácido nítrico y ácido nitroso.

Si bien estos compuestos se pueden producir de forma natural (por ejemplo el SO_2 es producido en procesos de erupción volcánica), la mayor parte de estos compuestos son causados por actividades antropogénicas como: el uso de vehículos que utilizan combustibles fósiles; la generación de energía termoeléctrica (en plantas que utilizan combustibles fósiles como el diesel o el carbón); la producción industrial de productos como ácido sulfúrico, pinturas y esmaltes; entre otros, son procesos en los que se emiten a la atmósfera grandes cantidades de SO_2 y NO_x . A nivel mundial, cerca del 40% de los óxidos de

nitrógeno que se emiten a la atmósfera provienen del sector de la transportación (automóviles, camiones, buses, trenes), el 25% proviene de la generación de energía termoeléctrica, y el resto proviene de los sectores industriales, comerciales y por procesos de combustión a nivel residencial ⁽¹⁰⁾.

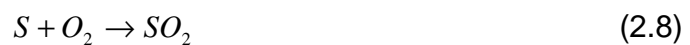
La lluvia ácida ocurre cuando estos gases reaccionan en la atmósfera con agua, oxígeno, y otros químicos para formar varios compuestos ácidos. La luz solar aumenta la velocidad de la mayoría de estas reacciones. El resultado es una solución diluida de ácido sulfúrico y de ácido nítrico. Una vez disueltos en el agua al caer en tierra los efectos de la lluvia ácida son normalmente medidos a través del análisis de la concentración de sulfatos y nitratos en el suelo.

Por acción del viento estos compuestos (SO_2 y NO_x) pueden causar lluvia ácida a distancias de hasta 1600 kilómetros del punto en donde fueron emitidos ⁽¹⁰⁾.

2.4.4 CINÉTICA Y TERMODINÁMICA DE LOS CONTAMINANTES PRECURSORES DE LA LLUVIA ÁCIDA

2.4.4.1 Termodinámica y cinética de la formación del dióxido de azufre

Los procesos de formación del SO_2 y el SO_3 no se pueden explicar cuantitativamente por las simples relaciones globales



Por ejemplo parece ser, que el monóxido, SO , es cinéticamente importante en el esquema de oxidación. Se sabe que la especie S_2O pudiera ser también importante en ciertas circunstancias. Tanto el SO como el S_2O son inestables y reactivos a las temperaturas atmosféricas, no se encuentran entre los productos normales de los procesos de combustión.

Los óxidos de azufre convencionales que se encuentran como productos estables, resultantes de la combustión a altas temperaturas de los combustibles que contienen azufre, son el SO_2 y el SO_3 . La relación de equilibrio termodinámico entre los dos, esta expresada por la ecuación 2.9). En la tabla 2-10 se presenta un resumen de los valores de la constante de equilibrio K_p , de los gases perfectos como función de la temperatura. De la observación de los valores de K_p de la tabla, es evidente que el equilibrio favorece al SO_3 a bajas temperaturas y al SO_2 a altas temperaturas en mezclas pobres (una relación de equivalencia menor que la unidad). Con base en esto, se podría esperar que se encontraran pequeñas cantidades de SO_3 en la zona actual de la flama, y grandes cantidades en los gases fríos de la combustión, puesto que el equilibrio se desplaza con la temperatura.

Tabla 2-10: Constantes de equilibrio para la reacción de oxidación del SO_2 a SO_3

t(°C)	T(°F)	Kp
25	77	2.6×10^{12}
277	440	2.6×10^5
727	1340	1.8
1227	2240	3.8×10^{-2}
1727	3140	5.6×10^{-3}

Fuente: Kenneth Wark; "Contaminación del Aire: Origen y Control"

El efecto contrario se observa en los hornos de plantas generadoras de energía. El nivel de SO_3 sobrepasa en la zona de la flama el valor de equilibrio pronosticado, mientras que en gas frío de la combustión, cerca de la salida, la concentración del SO_3 está muy por debajo del valor de equilibrio para dicha temperatura.

Este comportamiento anómalo del SO_3 se debe al papel de la cinética para determinar las tasas de formación de las varias especies intermedias en las etapas químicas elementales. Se ha propuesto que el monóxido, SO , constituye un importante producto intermedio dentro del esquema de reacción. Para abreviar, se supone que algún mecanismo produce SO a partir de las moléculas que contienen azufre, en el inicio de la zona de reacción. Se considera que las principales reacciones de formación del SO_2 son las siguientes:



En estas reacciones se producen también átomos de O y H , los que son altamente reactivos y que más tarde podrán incorporarse a un esquema global de reacción. También es importante conocer que las reacciones de oxidación del azufre ocurren simultáneamente con la oxidación de los hidrocarburos del combustible. Este último proceso es el que produce grandes cantidades de especies intermedias como O , H y OH , productos que quedan para posteriores reacciones de formación de óxidos de azufre.

El SO_2 es el principal óxido de azufre formado en los procesos de combustión, a pesar de las fuerzas termodinámicas deberían promover fuertemente la reacción hacia el SO_3 . La conversión final del SO_2 al SO_3 en la atmósfera debería ser un proceso lento, debido a las bajas tasas de conversión a las temperaturas ambientes. No obstante, una vez que el SO_2 esté en la atmósfera, la tasa se verá influenciada por catalizadores heterogéneos, presentes en la superficie de las partículas en suspensión. Esto llevará a un aumento en la tasa de conversión de SO_2 a SO_3 . Por desgracia conduce también a un aumento en la formación de sulfatos en forma de aerosol, y dichos aerosoles constituyen un riesgo para la salud humana. Existe una situación similar cuando se utilizan catalizadores de oxidación para controlar las emisiones de CO e hidrocarburos procedentes de automotores. Estos catalizadores aceleran la oxidación del SO_2

a SO_3 en el escape, y la formación de aerosoles de sulfatos aumenta notablemente ⁽²⁾.

2.4.4.2 Termodinámica y cinética de la formación de los óxidos de nitrógeno

Las dos reacciones globales de importancia son aquellas que producen monóxido de nitrógeno, NO, y dióxido de nitrógeno, NO_2 . Las reacciones en equilibrio son:



En la tabla 2-11 se muestra el valor de la constante de equilibrio K_p para la ecuación (2.12). El valor de K_p es extremadamente pequeño ($<10^{-4}$) para temperaturas por debajo de 727°C . Luego hasta esta temperatura, la presión parcial del NO y, por tanto, la cantidad en equilibrio de NO sería muy pequeña. Por encima de 727°C se podrían formar cantidades apreciables de NO.

Tabla 2-11: Constantes de equilibrio para la formación de monóxido de nitrógeno a partir de oxígeno y nitrógeno moleculares

t(°C)	T(°F)	Kp
300	80	10^{-30}
1000	1340	7.5×10^{-9}
1200	1700	2.8×10^{-7}
1500	2240	1.1×10^{-5}
2000	3140	4.0×10^{-4}
2500	4040	3.5×10^{-3}

Fuente: Kenneth Wark; "Contaminación del Aire: Origen y Control"

Los gases de combustión contienen predominantemente NO. Aproximadamente, del 90 al 95% del NO_x emitido en los procesos de combustión aparecerá bajo la forma de NO. El NO en los gases de la combustión es termodinámicamente inestable según entra al medio ambiente y cae su temperatura. No obstante, tanto la descomposición del NO en NO₂ y O₂, como la reacción de NO con el O₂ para formar NO₂ están limitadas cinéticamente. Según cae su temperatura por debajo de 1277 °C las tasas de estas reacciones se hacen muy pequeñas. Por tanto, la concentración final de los óxidos de nitrógeno en los gases de combustión se queda esencialmente bloqueada a los valores hallados durante su formación a temperaturas más altas. La cantidad de NO₂ formada a temperaturas mas bajas (por debajo de 1277 °C) será bastante pequeña. Por tanto, el NO formado de los gases de combustión a temperaturas más altas es arrastrado a la atmósfera ambiental. El volumen de la reacción de oxidación del NO al NO₂ tiene lugar en la atmósfera durante un periodo dictado por la cinética de las reacciones. La descomposición del NO en N₂ y O₂ esta limitada por la energía de activación (375 kJ/gmol) de la reacción, la que limita la tasa. Por tanto, el NO formado a temperaturas altas, forma preferentemente NO₂ a temperaturas mas bajas, antes que descomponerse ⁽²⁾.

2.5 EFECTOS DE LA LLUVIA ACIDA

2.5.1 EN LOS ECOSISTEMAS

El efecto ambiental más evidente que produce la lluvia ácida ha sido la pérdida de peces en ecosistemas acuáticos sensibles a la acidez. Muchas especies de peces no son capaces de sobrevivir en ambientes ácidos. La lluvia acida afecta a lagos y ríos de dos formas: crónica y episódica ⁽¹¹⁾. La acidificación crónica resulta de exposiciones prolongadas a lluvia ácida. La lluvia ácida reduce la alcalinidad (capacidad buffer) e incrementa la acidez del agua. La acidificación crónica puede reducir los niveles de calcio, lo que con el tiempo, puede debilitar a los peces y demás animales y plantas de los ecosistemas acuáticos ⁽¹¹⁾. La acidificación episódica es un cambio repentino del nivel de acidez en el agua.

Esto puede darse después de episodios de lluvia prolongados. La acidificación episódica puede provocar altas concentraciones de sustancias como el aluminio, que puede ser tóxico para los peces ⁽¹¹⁾.

Por otra parte, la lluvia ácida puede influenciar en la vegetación de los bosques y los suelos. La acidez de la lluvia debilita las defensas naturales de los árboles (por ejemplo altera la cera de la superficie de las hojas lo cual les hace más vulnerables a enfermedades y plagas. La lluvia ácida puede remover nutrientes del suelo como el calcio y el magnesio; y puede inhibir la germinación y reproducción de las plantas.

La lluvia ácida incrementa la concentración de nitratos en los ecosistemas. El nitrógeno es un nutriente importante de las plantas; sin embargo, la mayoría de los ecosistemas no pueden asimilar todo el nitrógeno disponible lo que produce niveles de saturación que afectan el equilibrio natural de estos ambientes ⁽¹¹⁾. Así por ejemplo, se pueden citar los procesos de eutrofización que producen el crecimiento de algas. Estas algas disminuyen la cantidad de oxígeno disuelto en los ecosistemas acuáticos, afectando de esta forma la calidad del agua y el equilibrio general de los ecosistemas.

2.5.2 EN LA SALUD PÚBLICA

Por otra parte, no se ha demostrado que la lluvia ácida tenga algún efecto directo sobre la salud pública ⁽¹¹⁾. Sin embargo, algunos estudios consideran que algunas de las partículas que son formadas a partir de sulfatos y nitratos pueden afectar la respiración. En episodios críticos de contaminación como los sucedidos en Londres (1954) y Donora (1948) se evidenciaron estos problemas respiratorios en la población.

2.5.3 EN LA INFRAESTRUCTURA FÍSICA

Finalmente, se ha demostrado que la deposición ácida ha causado el deterioro de edificios y monumentos ⁽¹¹⁾. Muchas de las edificaciones están construidas con materiales de construcción que contienen carbonato de calcio. El mármol es uno de estos materiales. La lluvia ácida puede convertir el carbonato de calcio en sulfato de calcio. El sulfato de calcio fácilmente puede “desmoronarse” y ser disuelto por el agua lluvia. Los sulfatos pueden destruir también estatuas de bronce.

CAPITULO 3

3.1 METODOLOGÍA Y MATERIALES EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN

3.1.1 METODOLOGÍA

Sobre la base de información existente en el CICAM (Centro de Investigaciones y Control Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional) referente a valores de pH y sólidos totales disueltos analizados en muestras de agua lluvia de la Estación Meteorológica del Observatorio Astronómico de Quito durante el período 2000-2006 se tratará de establecer una relación entre la contaminación ambiental atmosférica en el centro del DQM (especialmente de los contaminantes NO_2 , SO_2 y $\text{PM}_{2.5}$) y los niveles de pH y de sólidos totales disueltos de estas muestras de agua.

Para establecer esta relación se utilizó la siguiente metodología:

- En primer lugar se realizó un análisis de estadística descriptiva a la base de datos tanto para los valores de pH como para los valores de sólidos totales disueltos. Adicionalmente se realizaron cálculos para hallar la frecuencia relativa y acumulada de los datos; esto sirvió para graficar histogramas de frecuencia con el fin de analizar de mejor forma los resultados.
- Posteriormente se graficó la variación de los datos de pH y sólidos totales disueltos con respecto al tiempo (seis años de muestreo).
- Los datos que proporciona CORPAIRE respecto de la concentración de los diversos contaminantes corresponden a valores horarios. Para poder realizar análisis de correlación con los datos de pH y sólidos totales disueltos del agua lluvia se procedió a calcular los valores promedio (diarios) de concentración para cada contaminante en cada estación, y

adicionalmente el valor promedio diario en Quito (el valor promedio de todas las estaciones) para cada contaminante.

- Una vez obtenidos los valores promedio de contaminación ambiental se graficó la variación de la concentración de cada contaminante. Cabe señalar que para la realización de estos gráficos se tomaron en cuenta los valores promedio de toda la ciudad para cada contaminante.
- Para el análisis de correlación se tomaron en cuenta únicamente los dos últimos años de la base de datos debido a que los datos de contaminación ambiental atmosférica anteriores a los años 2005-2006 se encuentran incompletos.
- Para ciertos días los datos de concentración de los contaminantes de los años 2005-2006 no se encuentran disponibles por lo que el valor que se utilizó fue el del promedio de todas las estaciones con el fin de no alterar el valor promedio final. Estos valores se encuentran resaltados con negrillas en la base de datos presentada en los anexos.

En el estudio se realizaron las siguientes correlaciones:

1. pH vs. SO₂ estación Cotocollao
2. pH vs. SO₂ estación Carapungo
3. pH vs. SO₂ estación Belisario
4. pH vs. SO₂ estación Jipijapa
5. pH vs. SO₂ estación El Camal
6. pH vs. SO₂ estación Centro
7. pH vs. SO₂ promedio en el DMQ
8. pH vs. NO₂ estación Cotocollao
9. pH vs. NO₂ estación Carapungo
10. pH vs. NO₂ estación Belisario
11. pH vs. NO₂ estación Jipijapa
12. pH vs. NO₂ estación El Camal
13. pH vs. NO₂ estación Centro

14. pH vs. NO₂ estación Guamaní
15. pH vs. NO₂ promedio en el DMQ
16. STD vs. PM_{2.5} estación Cotocollao
17. pH vs. PM_{2.5} estación Carapungo
18. pH vs. PM_{2.5} estación Belisario
19. pH vs. PM_{2.5} estación Jipijapa
20. pH vs. PM_{2.5} estación El Camal
21. pH vs. PM_{2.5} estación Centro
22. pH vs. PM_{2.5} promedio en el DMQ

Finalmente, se realizó un modelo para correlacionar las variaciones de pH con las variaciones de SO₂ y NO₂ (promedio en el DQM) simultáneamente con el fin de encontrar un mayor grado de correlación entre las variables.

3.1.2 MATERIALES

Para la realización de este estudio se emplearon los siguientes materiales:

- Pluviómetro.
- Medidor de pH.

CAPITULO 4

4.1 RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1.1 RESULTADOS

De la base de datos proporcionada por el Centro de Investigación y Control Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional (que se encuentra en los anexos) se realizó un análisis estadístico preliminar de los valores de pH y sólidos totales disueltos de la lluvia recolectada en la estación meteorológica del Observatorio Astronómico de Quito durante un periodo de 6 años (2000-2006). Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 4-1: Estadísticas descriptivas de los valores de pH

Media	6.34
Mediana	6.29
Moda	6.52
Desviación estándar	0.66
Varianza de la muestra	0.43
Curtosis	0.22
Grado de asimetría	0.42
Numero de datos analizados	258
Mínimo	4.89
Máximo	8.38

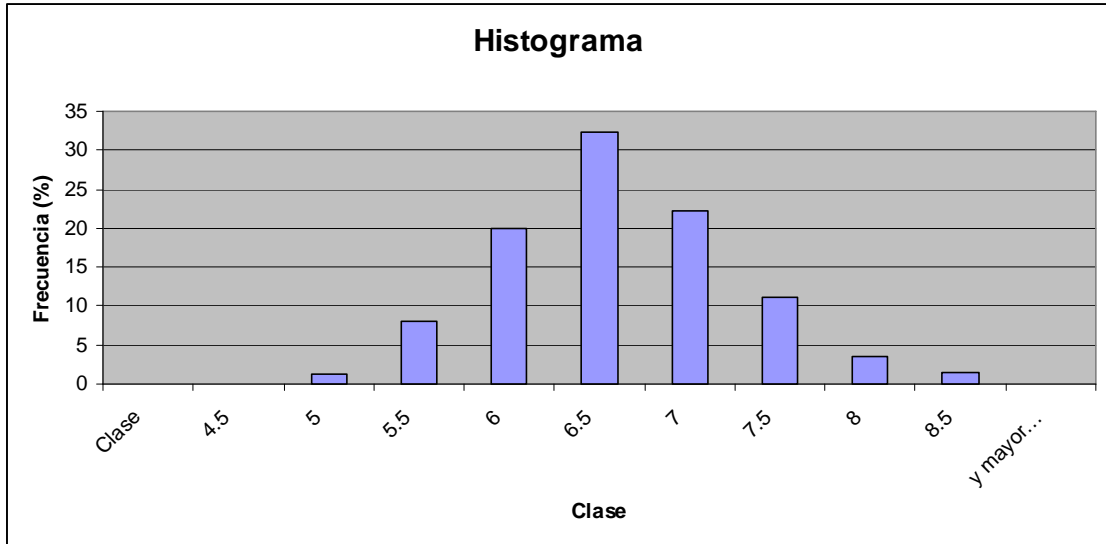
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Tabla 4-2: Rangos de clase y frecuencia acumulada para valores de pH

Clase	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada
4.5	0	0	0
5	3	1.15	1.15
5.5	21	8.08	9.23
6	52	20	29.23
6.5	84	32.31	61.54
7	58	22.31	83.85
7.5	29	11.15	95
8	9	3.46	98.46
8.5	4	1.54	100
y mayor...	0	0	100

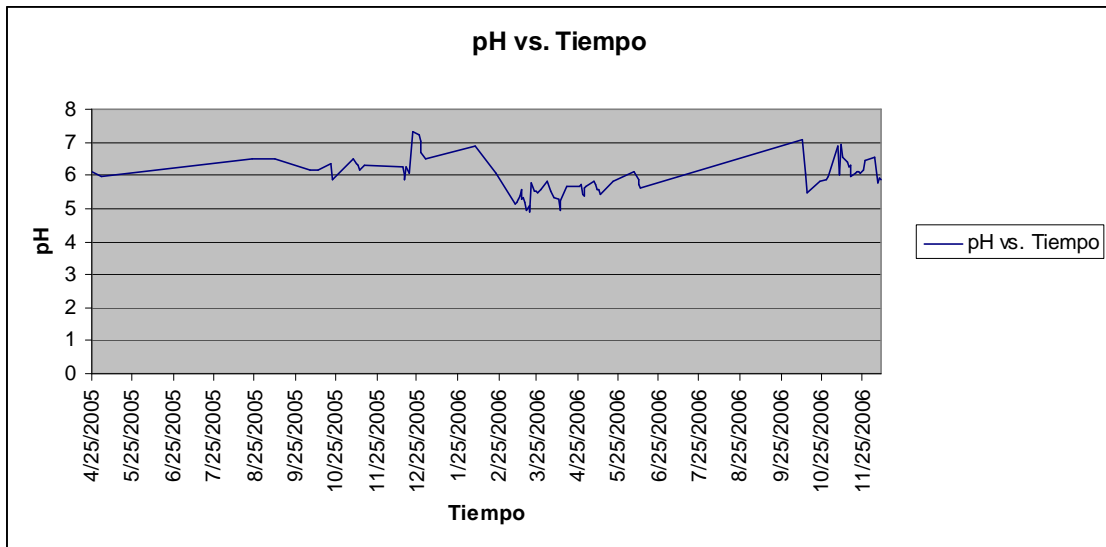
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-1: Histograma de frecuencias para valores de pH para el periodo 2000-2006



Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-2: Valores de pH en función del tiempo para el periodo 2000-2006.



Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Tabla 4-3: Estadísticas descriptivas de los valores de sólidos totales disueltos

Media	10.04
Mediana	8.5
Moda	8
Desviación estándar	7.49
Varianza de la muestra	56.05
Curtosis	65.64
Grado de asimetría	6.67
Numero de datos analizados	180
Mínimo	3
Máximo	88

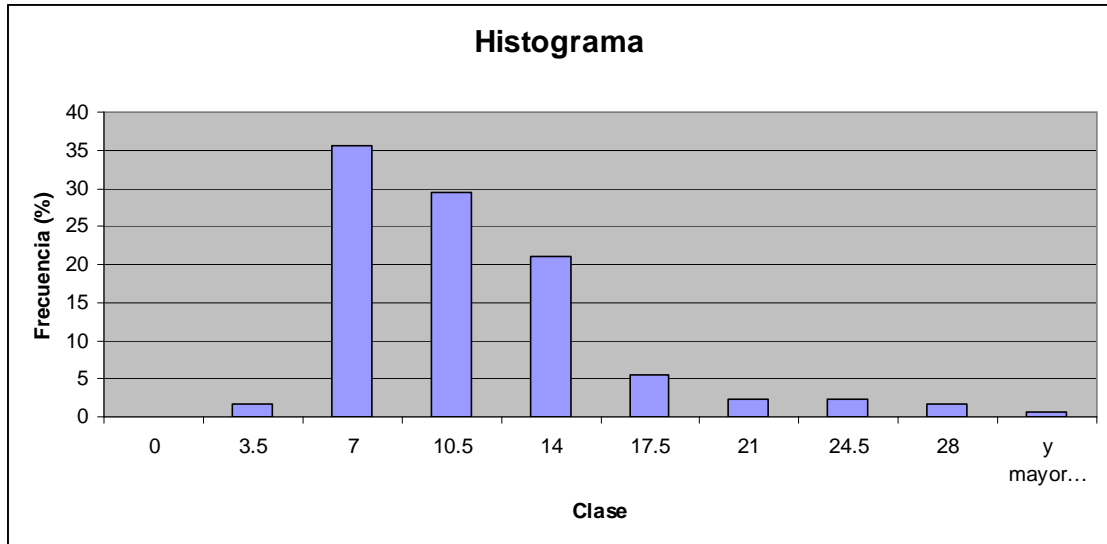
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Tabla 4-4: Rangos de clase y frecuencia acumulada para valores de sólidos totales disueltos

Clase	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada
0	0	0	0
3.5	3	1.67	1.67
7	64	35.56	37.22
10.5	53	29.44	66.67
14	38	21.11	87.78
17.5	10	5.56	93.33
21	4	2.22	95.56
24.5	4	2.22	97.78
28	3	1.67	99.44
y mayor...	1	0.56	100

Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-3: Histograma de frecuencias para valores de sólidos totales disueltos para el periodo 2000-2006



Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-4: Sólidos totales disueltos en función del tiempo para el periodo 2004-2006.

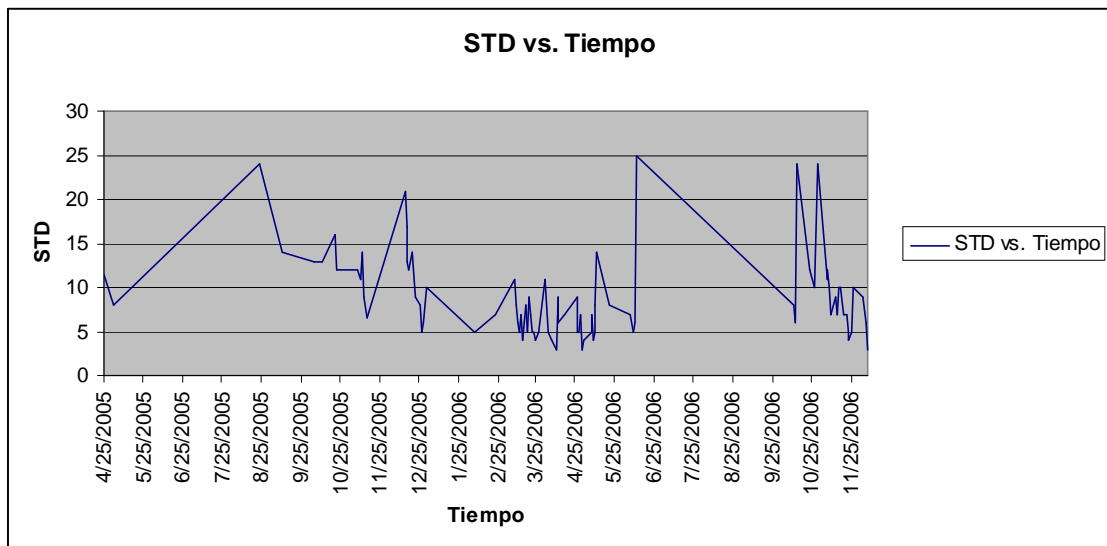
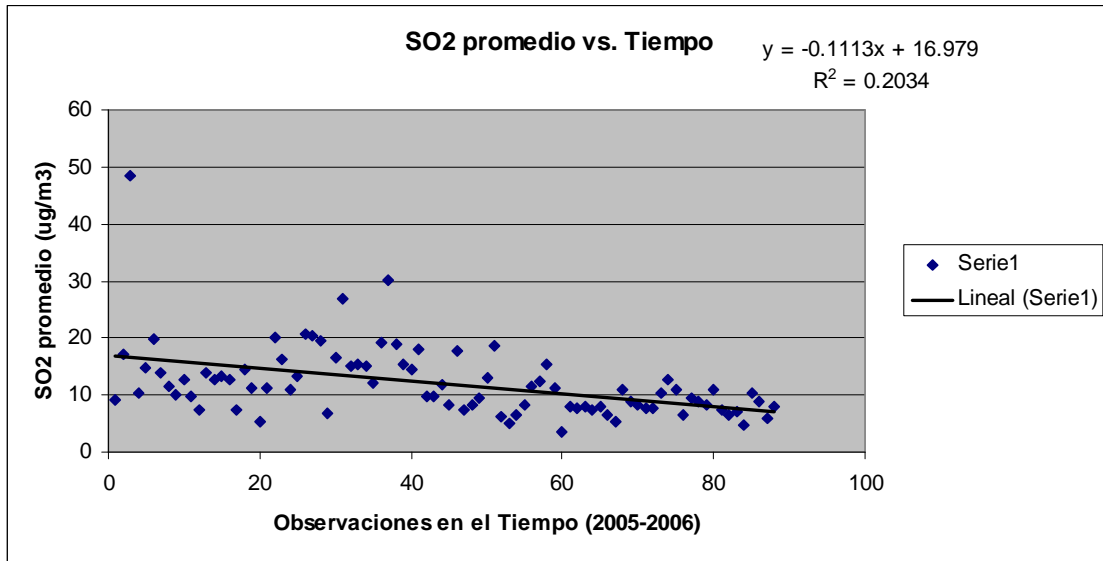
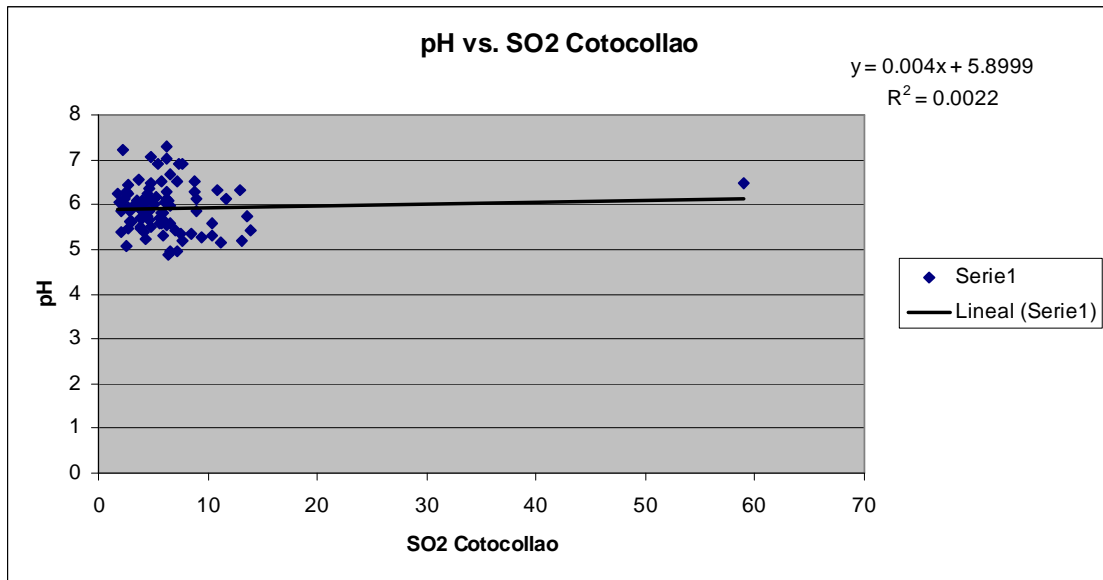


Figura 4-5: Concentración de SO₂ promedio en el DMQ vs. Tiempo



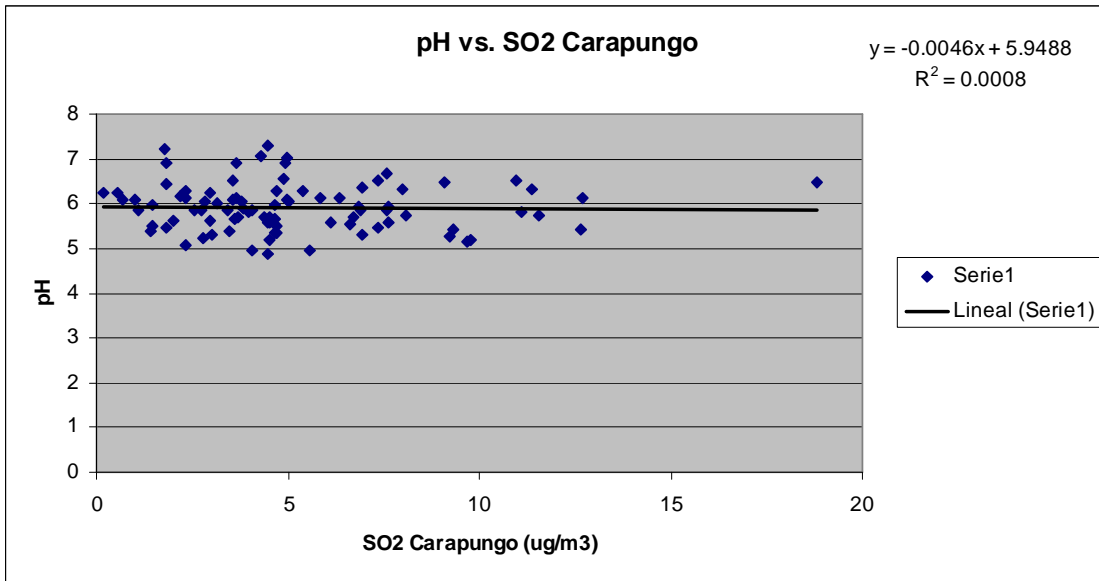
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-6: pH vs. Concentración promedio de SO₂ estación Cotocollao



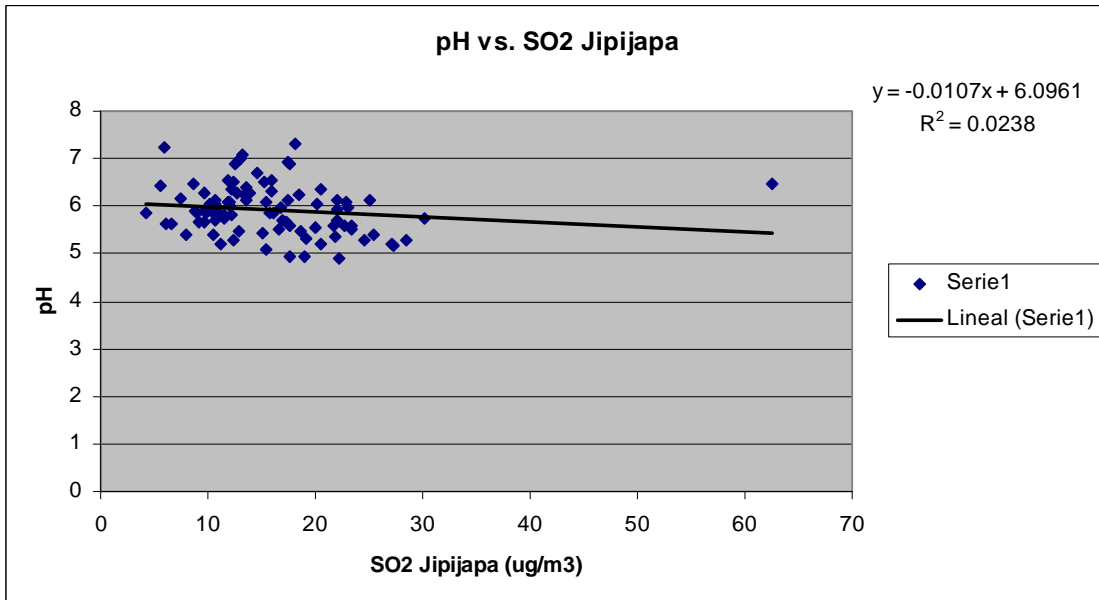
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-7: pH vs. Concentración promedio de SO₂ estación Carapungo



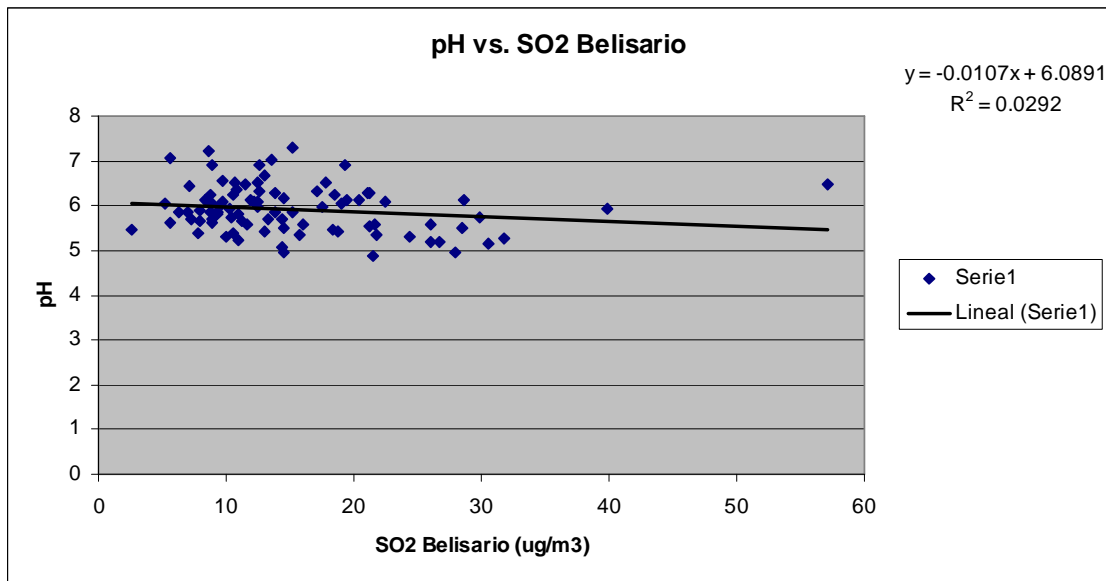
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-8: pH vs. Concentración promedio de SO₂ estación Jipijapa



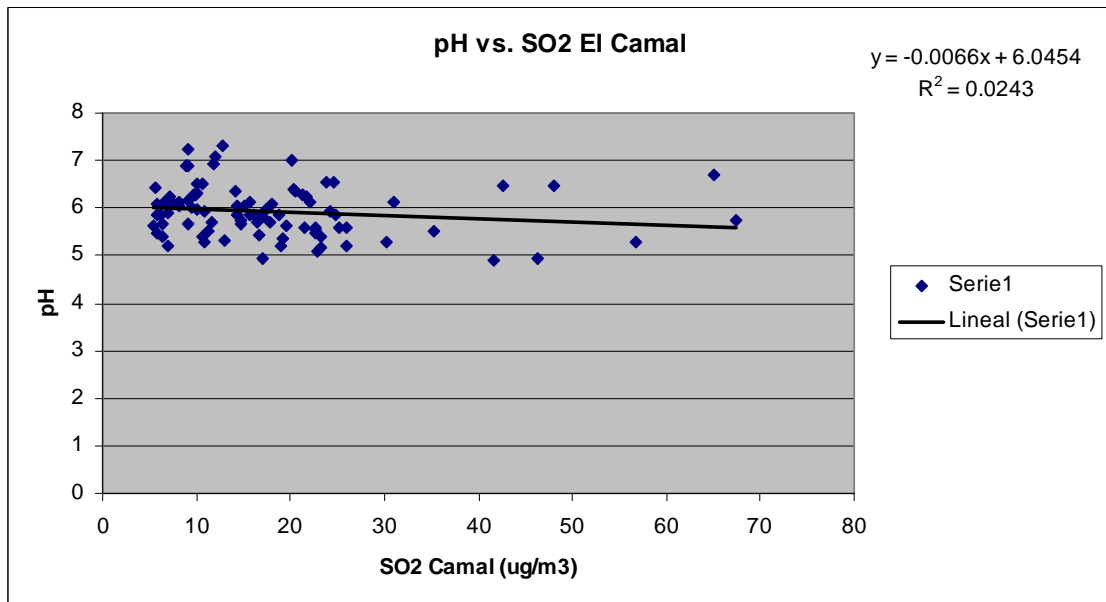
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-9: pH vs. Concentración promedio de SO₂ estación Belisario



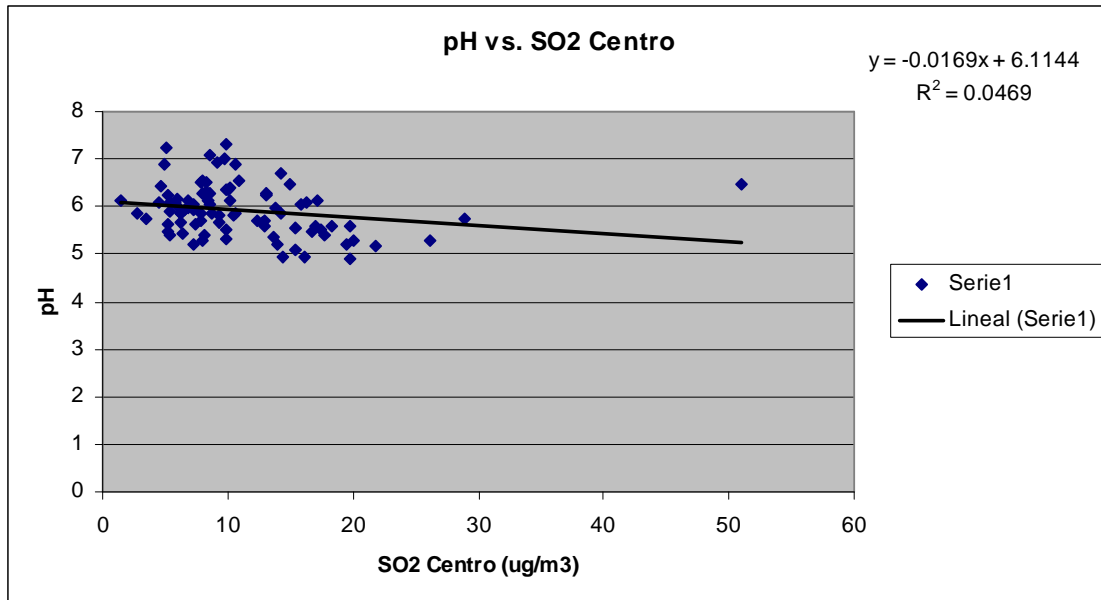
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-10: pH vs. Concentración promedio de SO₂ estación El Camal



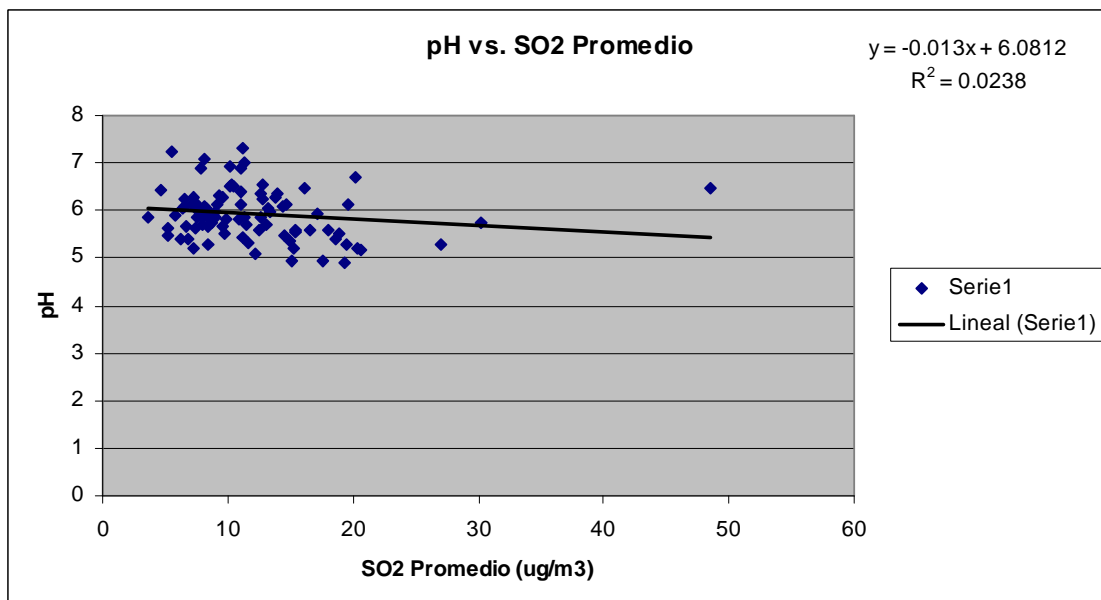
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-11: pH vs. Concentración promedio de SO₂ estación Centro



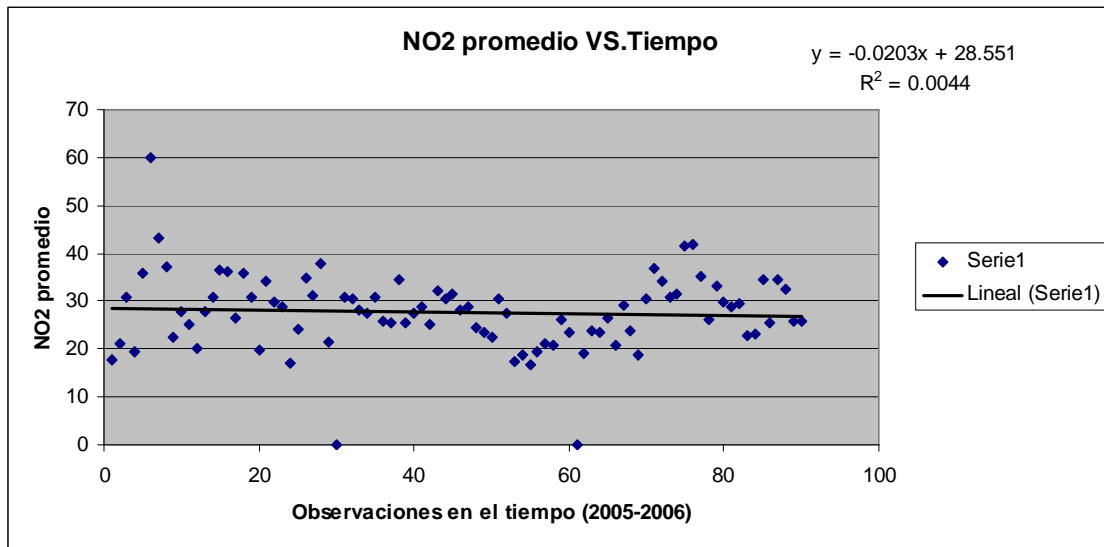
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-12: pH vs. Concentración promedio de SO₂ en el DMQ



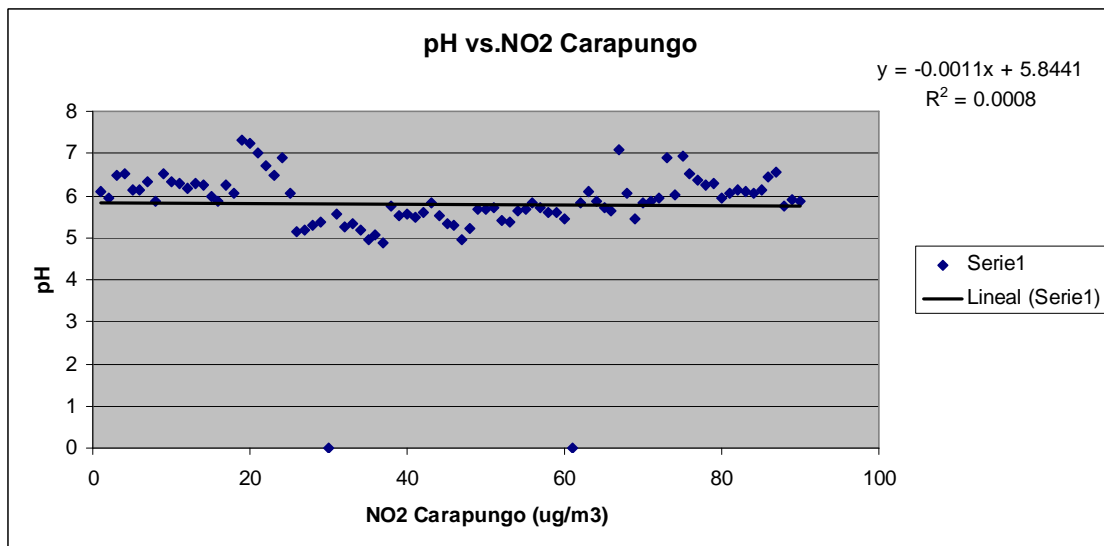
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-13: Concentración de NO₂ promedio en el DMQ vs. Tiempo



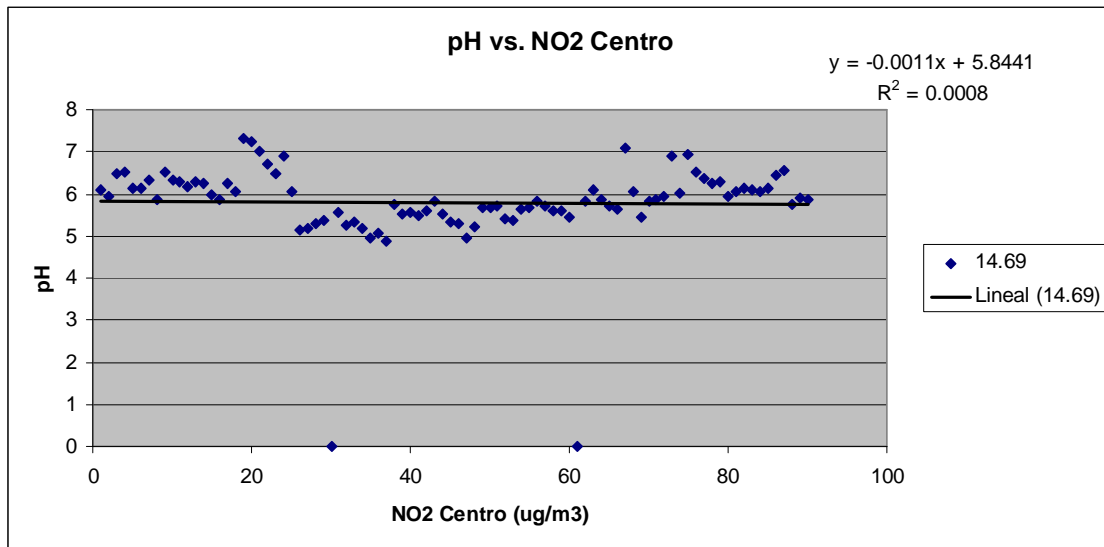
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-14: pH vs. Concentración promedio de NO₂ estación Carapungo



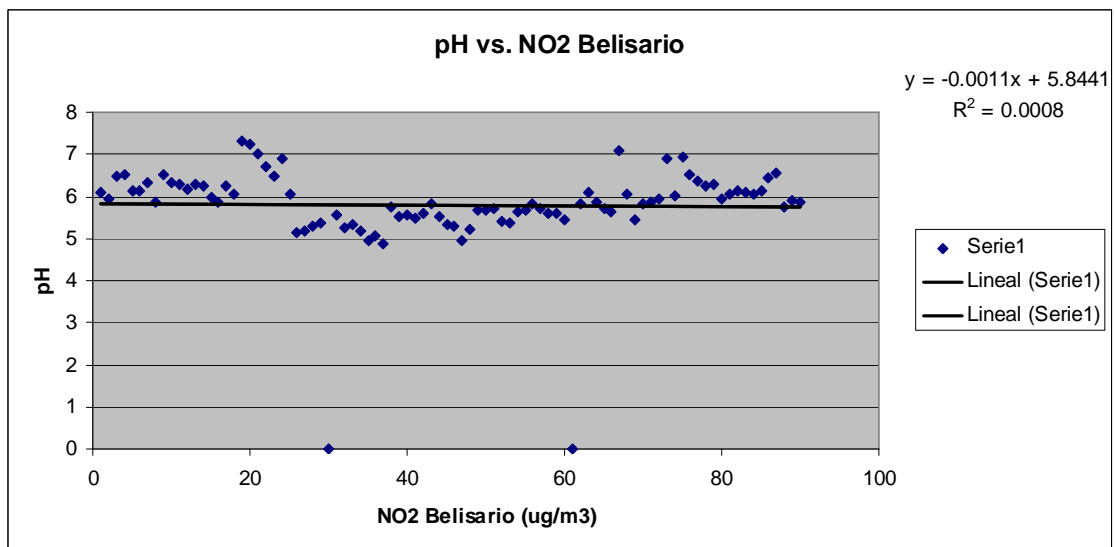
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-15: pH vs. Concentración promedio de NO₂ estación Centro



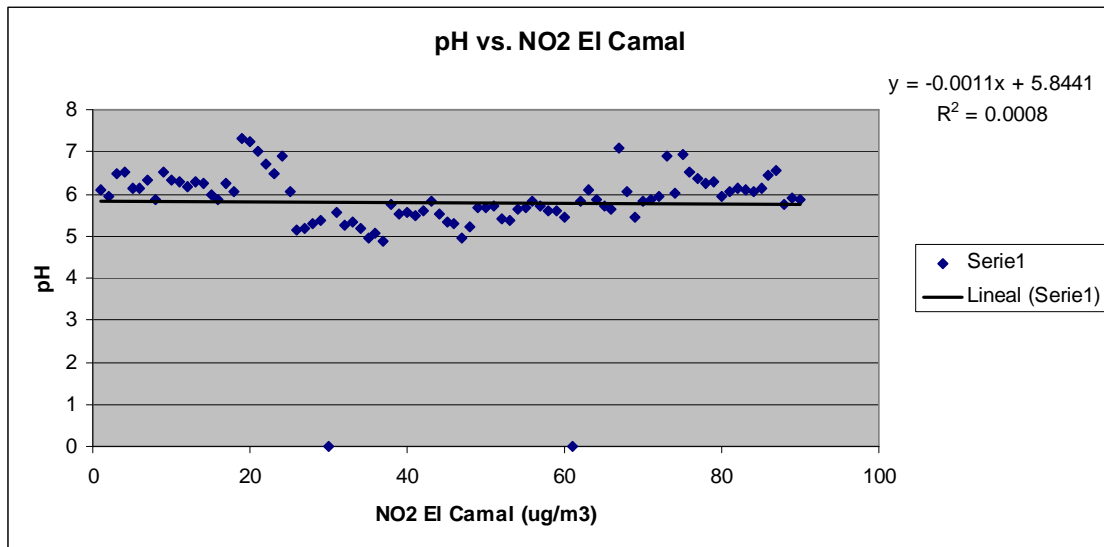
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-16: pH vs. Concentración promedio de NO₂ estación Belisario



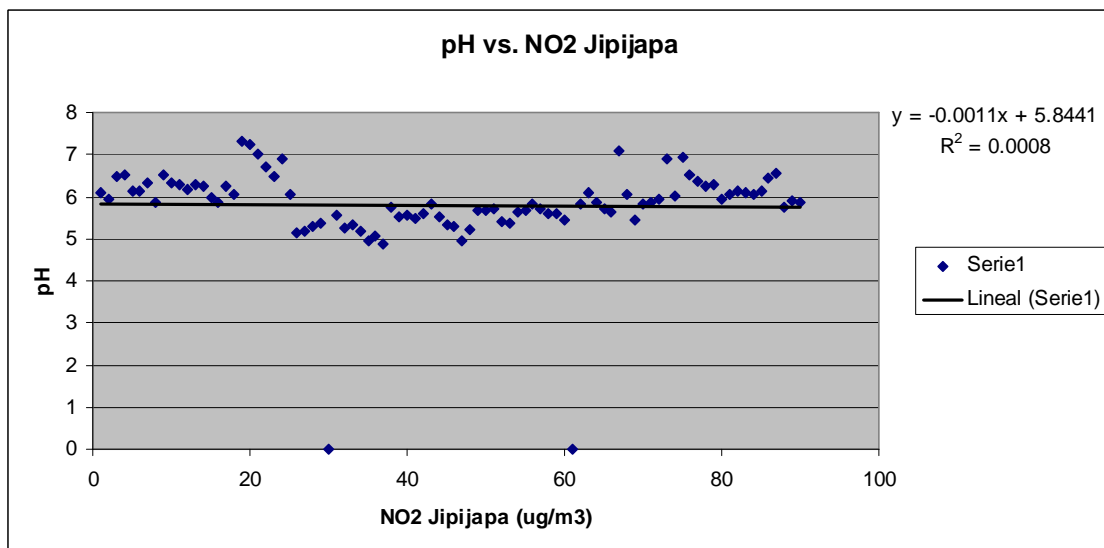
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-17: pH vs. Concentración promedio de NO₂ estación El Camal



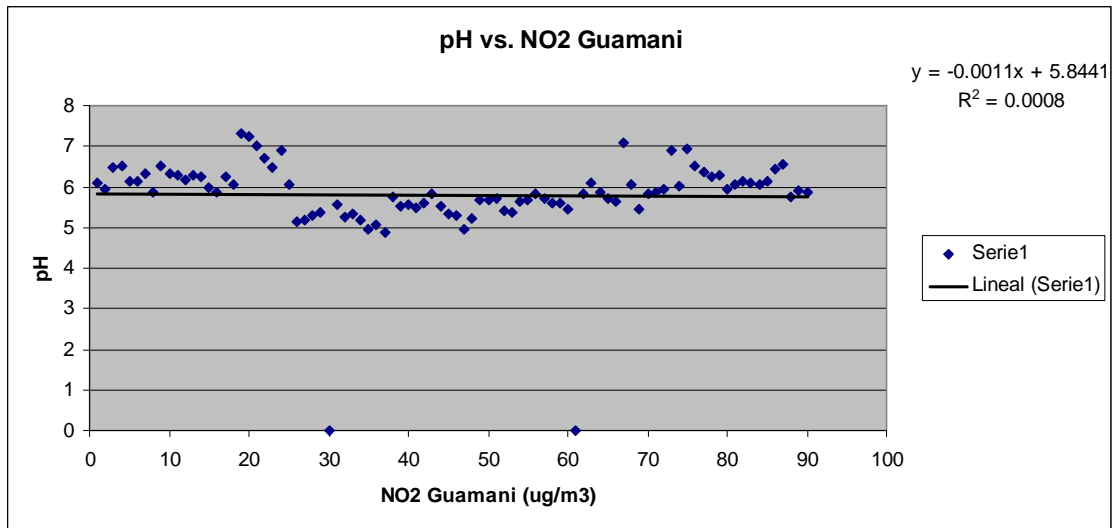
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-18: pH vs. Concentración promedio de NO₂ estación Jipijapa



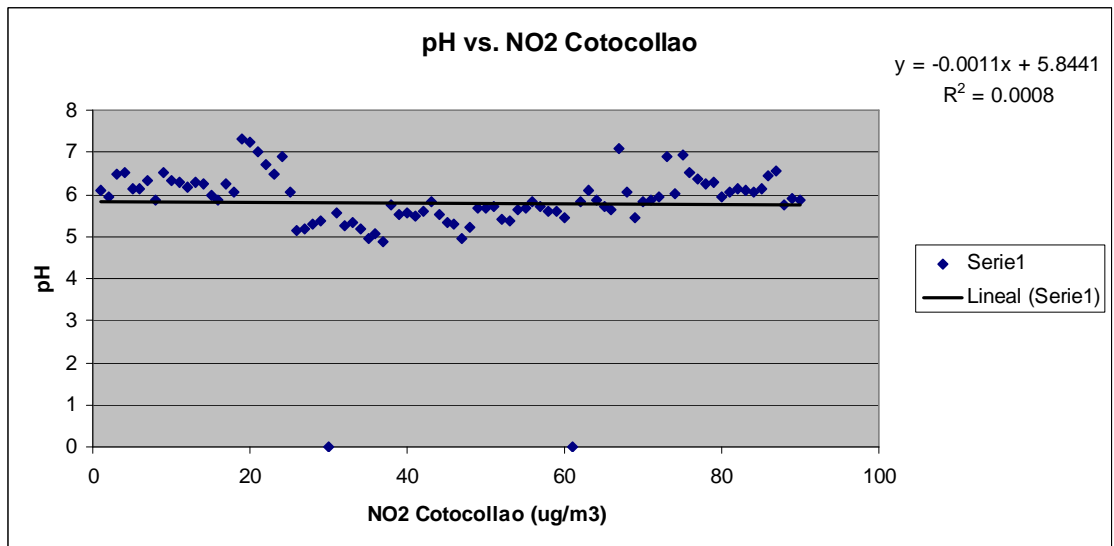
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-19: pH vs. Concentración promedio de NO₂ estación Guamani



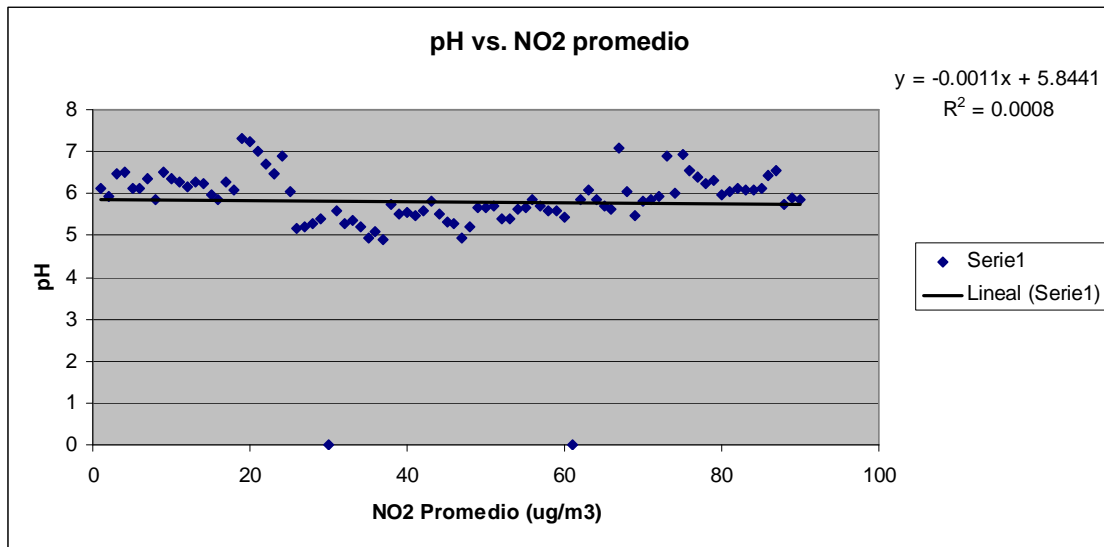
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-20: pH vs. Concentración promedio de NO₂ estación Cotocollao



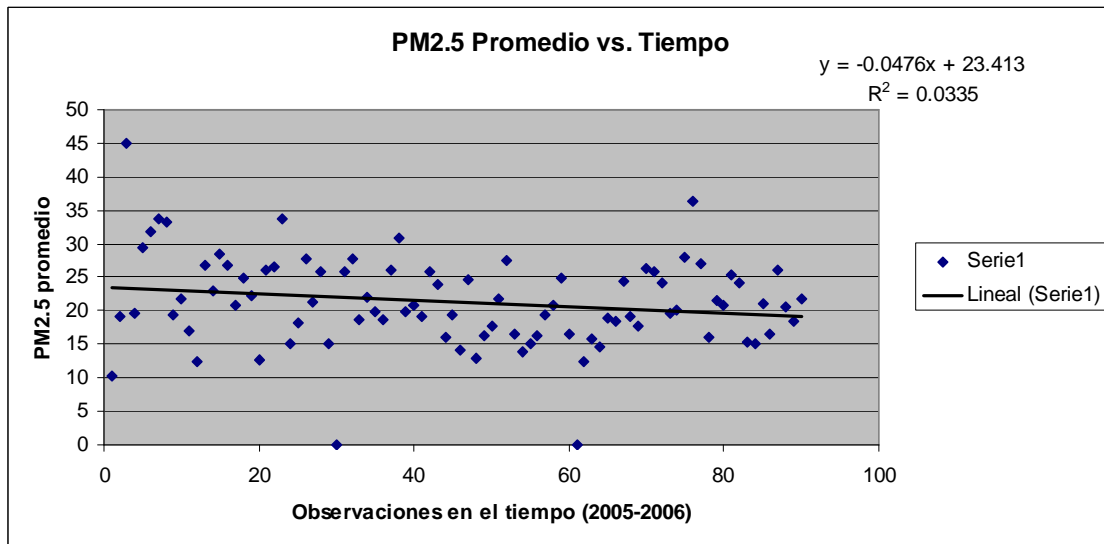
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-21: pH vs. Concentración promedio de NO₂ en el DMQ



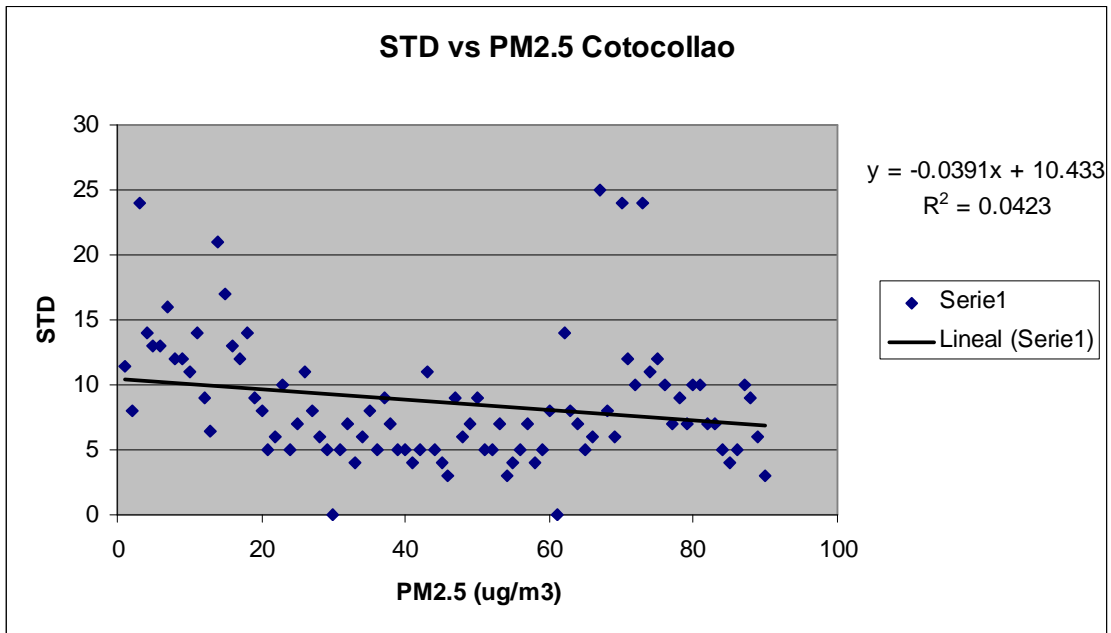
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-22: Concentración de PM_{2.5} promedio en el DMQ vs. Tiempo



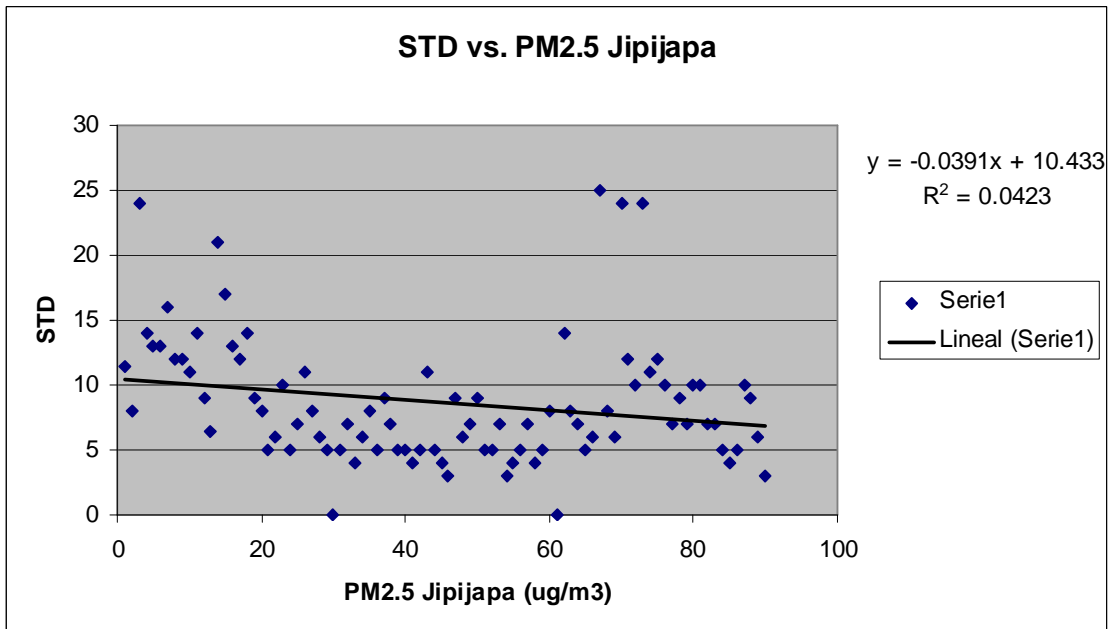
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-23: STD vs. Concentración promedio de PM_{2.5} estación Cotocollao



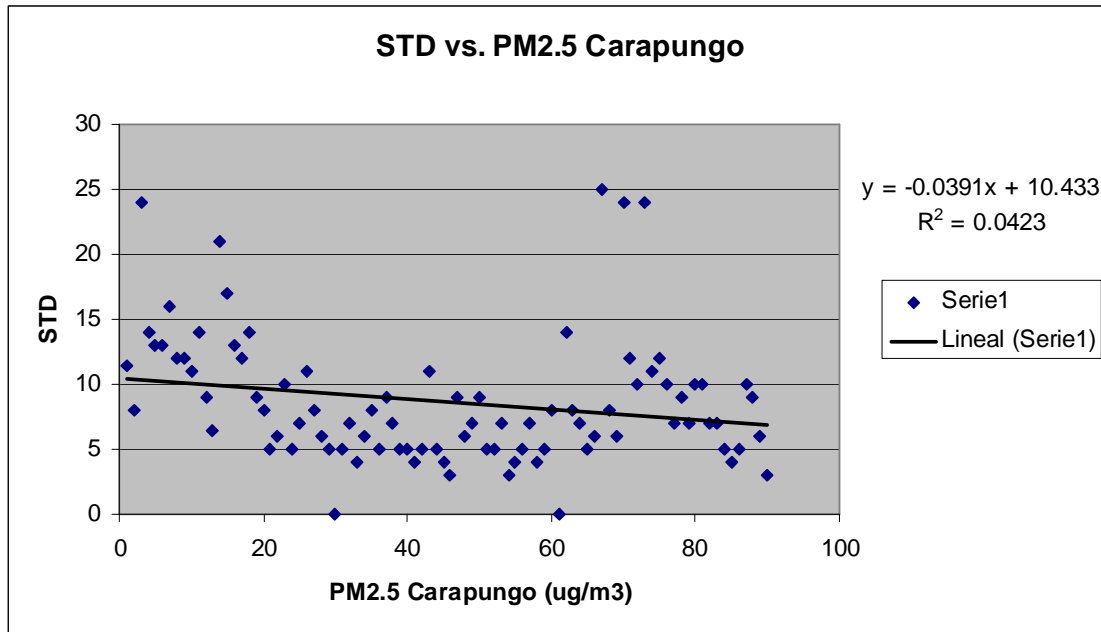
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-24: STD vs. Concentración promedio de PM_{2.5} estación Jipijapa



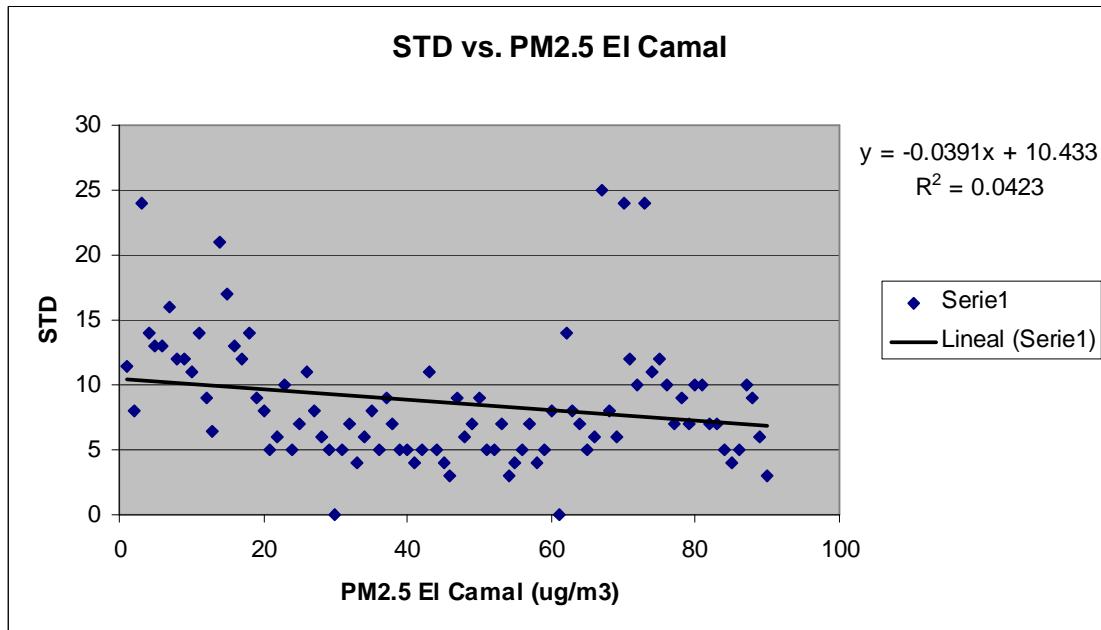
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-25: STD vs. Concentración promedio de PM_{2.5} estación Carapungo



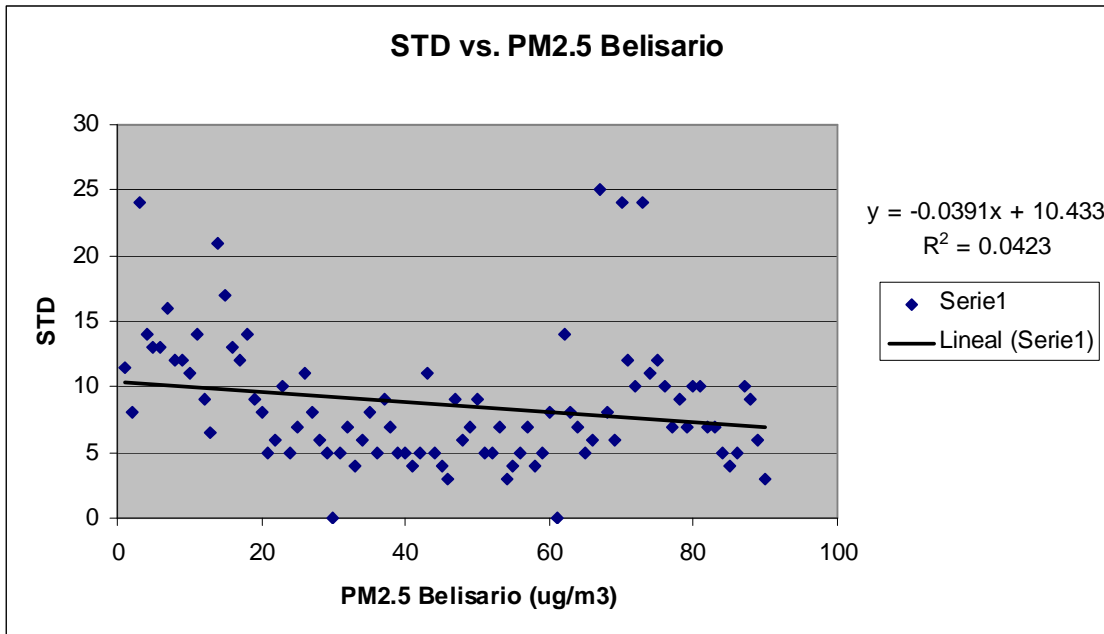
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-26: STD vs. Concentración promedio de PM_{2.5} estación El Camal



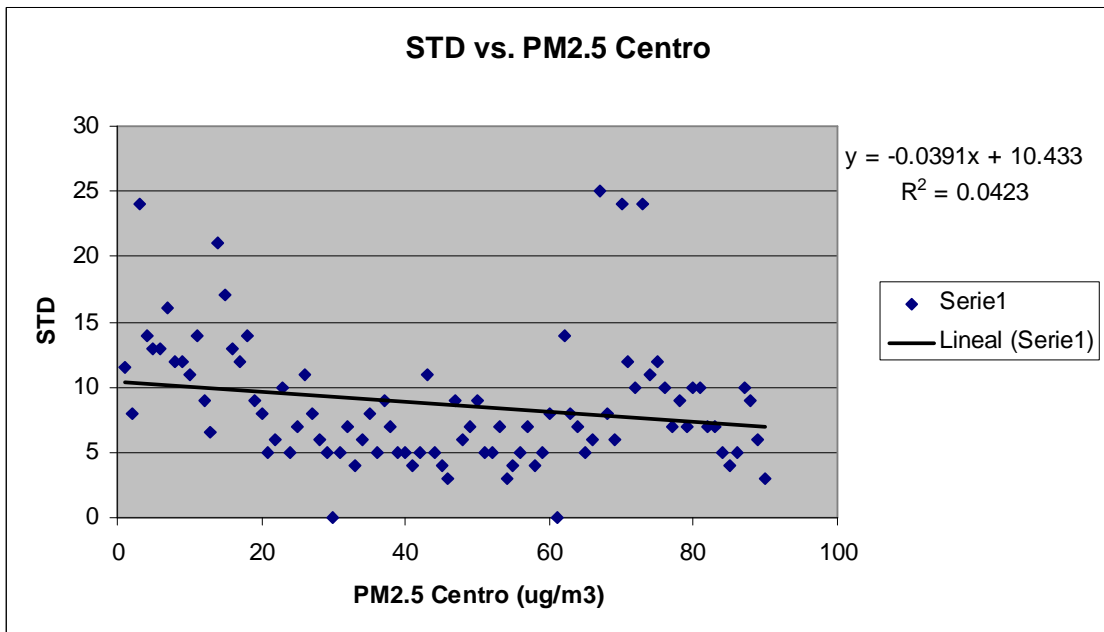
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-27: STD vs. Concentración promedio de PM_{2.5} estación Belisario



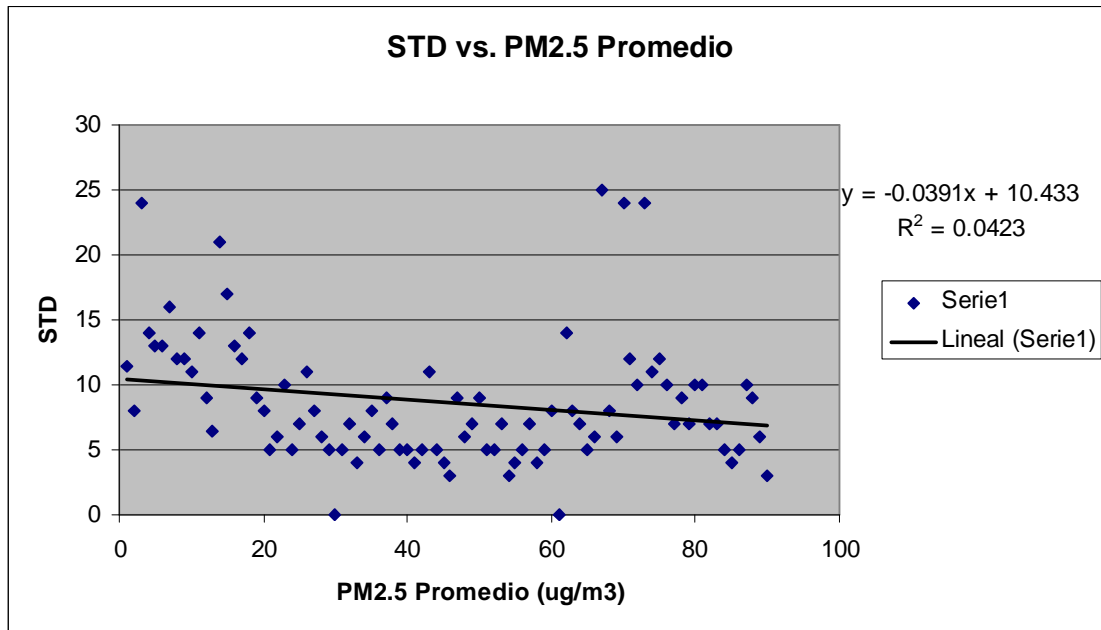
Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-28: STD vs. Concentración promedio de PM_{2.5} estación Centro



Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Figura 4-28: STD vs. Concentración promedio de PM_{2.5} en el DMQ



Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

Tabla 4-5: Estadísticas de regresión para el modelo pH vs. SO₂ y NO₂

R Múltiple	0.25
R Cuadrado	0.06
R Cuadrado Ajustado	0.04
Error Estándar	0.52
Observaciones	88.00

Fuente: Daniel A. Pazmiño V.

4.1.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En primer lugar el número de observaciones de la base de datos proporcionada por el CICAM (tanto para los valores de pH como para sólidos totales disueltos) para los seis años de muestreo es de 258. Este valor desde el punto de vista estadístico es representativo.

El valor promedio de pH del agua lluvia muestreada es de 6.34. Este valor nos indica en el sector donde se tomaron las muestras (Observatorio Astronómico de Quito) no existe un problema de lluvia ácida. Los valores obtenidos de mediana y moda, 6.29 y 6.52 respectivamente, confirman la afirmación anterior.

Sin embargo, del histograma de frecuencias realizado para los valores de pH se obtuvo que aproximadamente 10% de las observaciones corresponden a valores dentro del rango de lo que se considera lluvia ácida ($\text{pH} < 5.6$). Por otra parte, el valor mínimo de las observaciones es 4.58, lo cual se puede considerar lluvia muy ácida. Además, aproximadamente un 30% del agua lluvia que precipitó se encuentra fuera de los límites que señalan las normas ecuatorianas (para agua para consumo humano) que establecen que el pH del agua debe encontrarse dentro de un rango de 6 a 9. Por lo tanto, si bien se puede afirmar que no existe un problema de lluvia ácida en este sector de la ciudad es un hecho que una parte de la precipitación si fue ácida; y además, buena parte del agua que precipitó no era apta para el consumo directo.

En lo que respecta a la variación del pH con respecto al tiempo en la figura 8 se puede ver claramente que no existe ninguna tendencia clara. Las variaciones con el transcurso del tiempo son pequeñas y se acercan al valor promedio.

El valor promedio de sólidos totales disueltos es 10.04. El 35.56% de las observaciones se encuentran dentro del rango de 3.5 a 7 mg/lt. Se encontró un valor máximo de 88 que corresponde al día 31 de octubre de 2006. Este valor es considerado atípico pues se aleja de forma extrema al resto de valores por lo cual no fue considerado como válido.

Si bien los valores obtenidos de sólidos totales disueltos no constituyen un peligro para la salud (si esta agua hubiese sido consumida de forma directa) ya que se encuentran muy por debajo de lo que establecen las normas como límite (500 mg/lt), es evidente que la contaminación ambiental influye en estos valores

puesto de que lo contrario los valores se aproximarían a cero, y la figura 4-4 demuestra lo contrario.

Las concentraciones promedio de SO_2 , NO_2 y $\text{PM}_{2.5}$ en el DMQ para los dos años analizados (2005-2006) demuestran una clara tendencia a disminuir (aunque no se ajusten con precisión a una tendencia lineal).

Por lo expuesto anteriormente, no se puede establecer una relación entre la variación de la contaminación ambiental en el DQM con los niveles de pH del agua lluvia puesto que las variaciones de pH de las muestras no son significativas. Esto se ratifica al examinar los valores de coeficientes de correlación obtenidos para las diferentes estaciones y para los valores promedio en el DQM. De esta forma, se obtuvo que solo el 2.4% y 1.7% de las variaciones de concentración promedio en el DQM de SO_2 y NO_2 respectivamente explican las variaciones de pH en el tiempo (que como ya se mencionó son mínimas). Al realizar el análisis con las dos variables simultáneamente el porcentaje de correlación sube a 6.16%.

Sin embargo, cabe señalar que las variaciones de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ explican de mejor forma las variaciones de concentración de sólidos totales disueltos en el agua muestreada. Así, el coeficiente de correlación entre los sólidos totales disueltos y el $\text{PM}_{2.5}$ promedio de la ciudad fue de 15.7%, y alcanzó un 17% en el análisis realizado para la estación de Carapungo.

Si bien se han tomado muestras de agua lluvia de un solo punto de la ciudad (lo cual solo es representativo para el centro del DQM), dos factores podrían explicar la casi nula variación de los niveles de pH muestreados, y los bajos niveles de correlación entre sólidos totales disueltos y material particulado.

En primer lugar, se señaló en el capítulo 2 que las características topográficas y meteorológicas del DMQ claramente no favorecen la dispersión de los

contaminantes en la ciudad. Por lo tanto, el factor que explica la poca variación de los valores de pH del agua lluvia muestreada es el nivel de contaminación ambiental atmosférica en el DMQ. La concentración de los contaminantes NO_2 y SO_2 es baja comparada a los niveles de contaminación de las ciudades y países en los cuales se ha comprobado que existe lluvia ácida y que esta representa un serio problema ambiental. Así, las aproximadamente 26 mil toneladas de agentes precursores de lluvia ácida que se emiten anualmente en el DMQ son un cantidad relativamente baja comparada a las 90 millones de toneladas que se emiten anualmente en los Estados Unidos (1). Además, es importante señalar que según lo que se ha determinado en este estudio los niveles de SO_2 y NO_2 en los dos últimos años claramente han disminuido en el DMQ.

Finalmente, un modelo que involucre simultáneamente las concentraciones promedio de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} en la atmósfera explicaría de mejor forma la relación entre la contaminación ambiental atmosférica y los niveles de sólidos totales disueltos en el agua lluvia.

CAPITULO 5

5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.1 CONCLUSIONES

- Aproximadamente el 10% de las observaciones de los valores de pH son menores a 5.6. Este es el porcentaje de las observaciones que corresponden a lluvia ácida. Por lo tanto, se puede afirmar que no existe un problema de lluvia ácida en el centro de Quito. Sin embargo, quedó demostrado que durante el periodo 2000-2006 si existieron episodios de precipitación ácida.
- Aproximadamente un 30% del agua lluvia que precipitó se encuentra fuera de los límites que señalan las normas ecuatorianas (para agua para consumo humano) que establecen que el pH del agua debe encontrarse dentro de un rango de 6 a 9. Por lo tanto, si bien se puede afirmar que no existe un problema de lluvia ácida en este sector de la ciudad es un hecho que una buena parte del agua que precipitó no era apta para el consumo directo.
- La poca variación en los valores de pH del agua analizada se podría explicar por el efecto casi nulo que tiene en la formación de agua lluvia los bajos niveles de contaminación ambiental del DMQ (específicamente de los contaminantes precursores de la lluvia ácida NO_2 y SO_2). Se puede afirmar que los niveles de contaminación ambiental atmosférica son bajos en el DMQ si se los compara con áreas industriales del hemisferio norte del planeta en donde se ha comprobado que la lluvia ácida es un grave problema ambiental.
- Para poder establecer un modelo acertado que relacione los niveles de sólidos totales disueltos en el agua lluvia con los niveles de material particulado en la atmósfera de la ciudad es necesario involucrar no solo las concentraciones promedio del $\text{PM}_{2.5}$ sino también las de PM_{10} .

5.1.2 RECOMENDACIONES

- Es necesario monitorear el pH del agua lluvia de todas las estaciones meteorológicas del país para establecer como la evolución del desarrollo industrial en nuestro país afecta la calidad del aire y del agua lluvia que precipita.
- Si se quiere analizar con mayor detalle los efectos que puede tener la contaminación ambiental atmosférica en la calidad del agua lluvia se deben monitorear no solo los valores de pH del agua sino también parámetros como nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, nitritos, nitratos y sulfatos, pues son estos compuestos los que tienen mayor incidencia en los ecosistemas.
- Finalmente, estudios específicos sobre inversión térmica y perfiles de velocidad en el DMQ servirían de soporte para futuras investigaciones sobre lluvia ácida en la ciudad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Noel de Nevers; "Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire"; Mc Graw-Hill; 1998.
2. Kenneth Wark; "Contaminación del Aire: Origen y Control"; Limusa; 2002
3. CORPAIRE; "Informe Anual 2006: La Calidad del Aire en Quito"; Quito-Ecuador; enero 2007.
4. CORAIRE: "Inventario de Emisiones del Distrito Metropolitano de Quito 2003"; Quito-Ecuador; febrero 2006.
5. http://www.epa.gov/air/espanol/lluvia_acida/quespage.htm#Causa
6. <http://www.epa.gov/airmarkt/acidrain/effects/health.html>
7. <http://www.epa.gov/region1/eco/acidrain/intro.html>
8. <http://www.epa.gov/eco/acidrain/history/html>
9. <http://www.corpaire.org>
10. <http://www.epa.gov/region1/eco/acidrain/causes.html>
11. <http://www.eoa.gov/region1/eco/acidrain/envefects.html>

ANEXOS

Anexo 1: Valores de pH y sólidos totales disueltos (mg/l) empleados en los análisis de correlación

Muestra	Fecha	pH	STD
1	2005-04-25	6.11	11.5
2	2005-05-02	5.95	8
3	2005-08-23	6.48	24
4	2005-09-09	6.52	14
5	2005-10-05	6.14	13
6	2005-10-11	6.14	13
7	2005-10-21	6.34	16
8	2005-10-22	5.86	12
9	2005-11-07	6.52	12
10	2005-11-09	6.34	11
11	2005-11-11	6.28	14
12	2005-11-12	6.16	9
13	2005-11-15	6.29	6.5
14	2005-12-14	6.24	21
15	2005-12-15	5.99	17
16	2005-12-16	5.86	13
17	2005-12-17	6.26	12
18	2005-12-19	6.07	14
19	2005-12-22	7.31	9
20	2005-12-26	7.22	8
21	2005-12-27	7.01	5
22	2005-12-28	6.69	6
23	2005-12-31	6.48	10
24	2006-02-06	6.9	5
25	2006-02-22	6.05	7
26	2006-03-09	5.15	11
27	2006-03-10	5.2	8
28	2006-03-11	5.3	6
29	2006-03-12	5.39	5

Continua...

Continuación...

Anexo 1: Valores de pH y sólidos totales disueltos (mg/l) empleados en los análisis de correlación

Muestra	Fecha	pH	STD
30	2006-03-13	5.57	5
31	2006-03-14	5.27	7
32	2006-03-15	5.34	4
33	2006-03-16	5.2	6
34	2006-03-17	4.94	8
35	2006-03-19	5.08	5
36	2006-03-20	4.89	9
37	2006-03-21	5.75	7
38	2006-03-23	5.52	5
39	2006-03-24	5.55	5
40	2006-03-25	5.48	4
41	2006-03-28	5.6	5
42	2006-04-02	5.83	11
43	2006-04-04	5.52	5
44	2006-04-07	5.33	4
45	2006-04-10	5.29	3
46	2006-04-11	4.95	9
47	2006-04-12	5.22	6
48	2006-04-16	5.66	7
49	2006-04-26	5.67	9
50	2006-04-27	5.7	5
51	2006-04-28	5.41	5
52	2006-04-29	5.38	7
53	2006-04-30	5.62	3
54	2006-05-01	5.68	4
55	2006-05-07	5.84	5
56	2006-05-08	5.7	7
57	2006-05-09	5.59	4
58	2006-05-10	5.6	5
59	2006-05-11	5.43	8

Continua...

Continuación...

Anexo 1: Valores de pH y sólidos totales disueltos (mg/l) empleados en los análisis de correlación

Muestra	Fecha	pH	STD
60	2006-05-21	5.84	14
61	2006-06-06	6.09	8
62	2006-06-09	5.86	7
63	2006-06-10	5.7	5
64	2006-06-11	5.63	6
65	2006-10-11	7.07	25
66	2006-10-13	6.06	8
67	2006-10-14	5.46	6
68	2006-10-24	5.81	24
69	2006-10-28	5.85	12
70	2006-10-30	5.95	10
71	2006-11-06	6.9	24
72	2006-11-07	6.02	11
73	2006-11-08	6.92	12
74	2006-11-09	6.53	10
75	2006-11-13	6.38	7
76	2006-11-14	6.24	9
77	2006-11-15	6.3	7
78	2006-11-16	5.96	10
79	2006-11-19	6.05	10
80	2006-11-21	6.13	7
81	2006-11-22	6.1	7
82	2006-11-23	6.07	5
83	2006-11-25	6.14	4
84	2006-11-26	6.44	5
85	2006-12-04	6.55	10
86	2006-12-06	5.75	9
87	2006-12-07	5.9	6
88	2006-12-08	5.86	3

Anexo 2: Valores de concentración de SO₂ ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación

Fecha	SO2 Cotocollao	SO2 Carapungo	SO2 Belisario	SO2 Jipijapa	SO2 El Camal	SO2 Centro	SO2 Promedio
2005-04-25	2.46	2.33	28.6	13.64	6.54	1.44	9.17
2005-05-02	2.74	6.87	39.9	22.05	24.2	7.29	17.18
2005-08-23	58.98	18.79	57.11	62.59	42.53	51.05	48.51
2005-09-09	7.19	10.95	10.71	15.31	10.06	8.3	10.42
2005-10-05	8.89	5.85	19.48	21.99	22.06	10.15	14.74
2005-10-11	11.7	12.69	20.4	25.16	30.94	17.14	19.67
2005-10-21	12.93	11.37	17.1	12.17	20.47	10	14.01
2005-10-22	8.95	6.89	15.19	10.96	15.74	10.61	11.39
2005-11-07	8.76	3.58	17.85	12.4	10.75	7.78	10.19
2005-11-09	10.85	7.98	12.67	20.49	14.17	9.87	12.67
2005-11-11	6.22	2.33	21.25	9.66	9.87	8.64	9.66
2005-11-12	5.23	2.19	14.47	7.41	9.14	6	7.41
2005-11-15	8.86	4.69	21.06	13.83	21.39	13.14	13.83
2005-12-14	4.46	0.53	18.51	18.47	21.64	13.1	12.79
2005-12-15	6.6	1.46	17.58	22.98	17.53	13.73	13.31
2005-12-16	4.15	2.72	13.79	16.18	24.79	14.17	12.63
2005-12-17	2.79	0.17	10.5	12.63	9.63	7.98	7.28
2005-12-19	6.32	0.7	22.41	22.95	18	16.28	14.44
2005-12-22	6.2	4.48	15.24	18.21	12.87	9.85	11.14
2005-12-26	2.23	1.79	8.64	5.97	9.02	5.15	5.46
2005-12-27	6.25	4.97	13.5	13.07	20.23	9.78	11.3
2005-12-28	6.52	7.59	12.97	14.61	65.02	14.26	20.16
2005-12-31	4.8	9.09	11.56	8.65	48.12	14.91	16.19
2006-02-06	7.35	1.83	19.35	17.69	8.97	10.62	10.97
2006-02-22	6.12	3.78	19.05	20.19	14.28	15.89	13.22
2006-03-09	11.19	9.7	30.51	27.37	23.2	21.8	20.63
2006-03-10	13.08	9.79	26.7	27.05	25.88	19.51	20.34
2006-03-11	10.37	6.96	24.36	24.63	30.23	19.98	19.42
2006-03-12	2.12	1.43	10.6	7.92	10.6	8.18	6.81

Continua....

Continuación...

Anexo 2: Valores de concentración de SO₂ ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación

Fecha	SO2 Cotocollao	SO2 Carapungo	SO2 Belisario	SO2 Jipijapa	SO2 El Camal	SO2 Centro	SO2 Promedio
2006-03-13	6.61	4.53	25.98	22.66	21.45	18.24	16.58
2006-03-14	9.43	9.22	31.78	28.44	56.71	26.22	26.97
2006-03-15	8.41	4.7	21.74	21.91	19.12	13.68	14.93
2006-03-16	7.75	4.54	26.06	20.55	19.07	13.93	15.31
2006-03-17	6.61	4.06	28	18.96	17.09	16.19	15.15
2006-03-19	2.61	2.32	14.36	15.46	22.8	15.42	12.16
2006-03-20	6.34	4.47	21.55	22.2	41.7	19.72	19.33
2006-03-21	13.55	11.57	29.9	30.15	67.34	28.96	30.25
2006-03-23	3.82	4.71	28.48	23.34	35.19	17.39	18.82
2006-03-24	6.21	6.62	21.25	19.98	22.58	15.35	15.33
2006-03-25	3.87	7.36	18.32	18.56	22.72	16.72	14.59
2006-03-28	10.46	7.63	21.68	23.43	25.22	19.77	18.03
2006-04-02	5.72	3.95	10.92	11.45	16.38	10.5	9.82
2006-04-04	4.83	1.47	14.46	16.56	11.32	9.91	9.76
2006-04-07	7.58	4.65	15.69	19.19	13.03	9.93	11.68
2006-04-10	5.97	3.02	9.99	12.37	10.87	7.99	8.37
2006-04-11	7.26	5.58	14.5	17.57	46.38	14.36	17.61
2006-04-12	4.33	2.77	11	11.17	7.07	7.27	7.27
2006-04-16	4.64	4.67	7.98	9.21	14.73	9.25	8.41
2006-04-26	5.91	3.62	11.25	17.37	6.39	12.77	9.55
2006-04-27	5.63	6.7	14.45	21.96	16.5	12.98	13.04
2006-04-28	13.94	12.67	18.76	25.37	23.25	17.69	18.61
2006-04-29	4.16	3.46	7.87	10.48	6.3	5.37	6.27
2006-04-30	2.87	1.99	8.91	6.68	5.33	5.21	5.17
2006-05-01	3.82	3.71	7.27	9.64	9.06	6.3	6.63
2006-05-07	2.86	2.56	7.01	10.59	18.77	8.75	8.42
2006-05-08	4.05	4.38	13.34	16.89	17.88	12.39	11.49
2006-05-09	5.6	4.48	11.61	17.56	22.67	12.99	12.49
2006-05-10	5.78	6.13	16.07	21.68	25.9	17.02	15.43
2006-05-11	6.96	9.33	13.02	15.08	16.61	6.41	11.24

Continua....

Continuación...

Anexo 2: Valores de concentración de SO₂ ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación

Fecha	SO2 Cotocollao	SO2 Carapungo	SO2 Belisario	SO2 Jipijapa	SO2 El Camal	SO2 Centro	SO2 Promedio
2006-05-21	2.08	1.08	6.25	4.23	5.76	2.71	3.69
2006-06-06	6.28	4.97	12.48	12.01	6.88	5.78	8.07
2006-06-09	4.26	3.43	9.28	15.83	6.22	6.22	7.54
2006-06-10	4.44	4.5	8.89	10.74	11.66	7.87	8.02
2006-06-11	3.11	2.95	5.61	6.05	19.58	7.47	7.46
2006-10-11	4.86	4.28	5.65	13.21	12.04	8.63	8.11
2006-10-13	4.35	2.85	5.26	10.64	8.16	7.3	6.43
2006-10-14	2.74	1.81	2.54	12.94	5.84	5.3	5.2
2006-10-24	5.97	11.09	9.37	12.24	16.98	9.36	10.84
2006-10-28	4.61	7.56	8.73	9.03	16.10	7.82	8.98
2006-10-30	3.72	7.63	10.26	9.84	10.77	6.57	8.13
2006-11-06	7.75	3.65	8.86	12.47	9.14	4.98	7.81
2006-11-07	5.16	3.17	9.54	12.07	9.5	5.89	7.56
2006-11-08	5.42	4.93	12.63	17.49	11.83	9.15	10.24
2006-11-09	5.74	7.33	12.41	15.96	24.57	10.96	12.83
2006-11-13	4.61	6.92	10.77	13.62	20.27	10.24	11.07
2006-11-14	1.69	2.97	8.7	13.43	7.24	5.22	6.54
2006-11-15	2.58	5.37	13.82	15.9	10.08	8.34	9.35
2006-11-16	3.25	4.67	12.47	16.77	10	6.78	8.99
2006-11-19	1.85	5.02	8.84	10.17	15.12	8.53	8.26
2006-11-21	6.28	6.35	11.98	17.43	15.64	8.46	11.02
2006-11-22	3.56	1	12.15	15.46	7.47	5.36	7.50
2006-11-23	4.07	3.56	9.69	11.89	5.8	4.46	6.58
2006-11-25	4.59	3.67	8.36	10.61	8.21	6.89	7.06
2006-11-26	2.7	1.83	7.12	5.54	5.69	4.62	4.58
2006-12-04	3.72	4.88	9.75	11.94	23.82	7.97	10.35
2006-12-06	4.4	8.09	10.4	11.45	14.79	3.42	8.76
2006-12-07	2.24	3.82	7.94	8.77	6.91	5.43	5.85
2006-12-08	3.98	4.07	9.31	9.82	14.3	6.2	7.95

Anexo 3: Valores de concentración de NO₂ ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación

Fecha	NO2 Cotocollao	NO2 Carapungo	NO2 Belisario	NO2 Jipijapa	NO2 EI Camal	NO2 Centro	NO2 Guamani	NO2 Promedio
2005-04-25	15.93	5.73	21.25	24.28	22.1	26.5	8.93	17.82
2005-05-02	15.09	7.94	26.67	26.47	31.34	30.49	9.26	21.04
2005-08-23	37.86	17.74	46.9	30.96	41.31	33.49	8.55	30.96
2005-09-09	25.01	22.43	20.88	27.08	21	15.83	4.23	19.49
2005-10-05	28.1	22.99	50.93	51.85	46.6	38.39	11.27	35.73
2005-10-11	40.88	44.17	68.32	88.74	74.54	70.65	31.28	59.80
2005-10-21	36.12	31.33	59.83	54.74	53.47	50.46	16.16	43.16
2005-10-22	23.86	22.44	51.58	37.22	53.4	45.97	26.05	37.22
2005-11-07	16.13	10.99	22.32	25.08	27.29	32.15	22.3	22.32
2005-11-09	20.9	15.66	27.86	42.85	32.34	33.98	21.44	27.86
2005-11-11	9.42	9.45	44.03	25.04	31	34.62	21.73	25.04
2005-11-12	6.62	7.34	29.77	20.11	30.57	25.27	21.06	20.11
2005-11-15	16.75	15.24	41.65	27.64	34.47	33.97	23.78	27.64
2005-12-14	21.96	12.02	47.2	30.61	41.3	41.11	21.94	30.88
2005-12-15	29.84	18.74	48.8	43.34	46.5	46.23	21.74	36.46
2005-12-16	23.84	19.79	48.57	38.43	47.45	50.02	24.2	36.04
2005-12-17	21.6	9.37	37.69	27.92	33.14	33.15	21.83	26.39
2005-12-19	28.11	14.06	50.11	40.68	49.45	46.92	22.64	36.00
2005-12-22	20.41	15.71	40.26	40.38	40.96	39.78	18.19	30.81
2005-12-26	11.54	6.25	24.98	21.06	27.62	29.27	16.45	19.60
2005-12-27	31.92	21.59	37.59	41.4	44.71	41.7	19.72	34.09
2005-12-28	24.64	21.04	37.99	35.81	37.78	37.31	14.94	29.93
2005-12-31	19.5	22.04	33.2	26.93	41.63	35.12	22.25	28.67
2006-02-06	12	4.43	23.54	19.58	22.34	22.81	13.8	16.93
2006-02-22	19.01	8.71	31.53	22.08	38.52	30.57	18.3	24.10
2006-03-09	30.3	20.71	48.64	40.6	37.7	41.91	24.86	34.96
2006-03-10	30.09	19.67	44.3	38.68	32.36	37.91	15.6	31.23
2006-03-11	32.05	19.8	52.52	45.49	47.85	43.7	23.45	37.84
2006-03-12	18.42	10.77	31.82	20.92	23.66	25.28	18.4	21.32

Continua...

Continuación...

Anexo 3: Valores de concentración de NO₂ ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación

Fecha	NO2 Cotocollao	NO2 Carapungo	NO2 Belisario	NO2 Jipijapa	NO2 EI Camal	NO2 Centro	NO2 Guamani	NO2 Promedio
2006-03-13	22.96	17.66	44.13	34.81	34.75	38.15	23.36	30.83
2006-03-14	19.44	20.28	40.95	28.47	44.37	40.14	18.84	30.36
2006-03-15	23.24	12.49	39.07	32.85	38.77	34.75	16.92	28.30
2006-03-16	20.5	13.27	38.97	29.4	40.53	36.12	14.14	27.56
2006-03-17	23.34	16.99	43.26	30.4	42.66	38.8	19.79	30.75
2006-03-19	19.2	13.79	34.37	23.64	36.7	34.38	18.75	25.83
2006-03-20	25.77	18.78	37.49	16.13	26.54	36.61	16.89	25.46
2006-03-21	31.36	24.39	43.14	34.39	47.21	40.67	20.14	34.47
2006-03-23	16.45	9.99	37.67	25.33	34.96	32.85	20.04	25.33
2006-03-24	22.55	13.8	33.25	27.35	36.91	35.67	21.9	27.35
2006-03-25	25.06	22.87	35	28.86	37.08	35.75	17.38	28.86
2006-03-28	21.22	18.16	31.83	25.24	34.66	32.36	13.21	25.24
2006-04-02	27.31	22.66	41.26	33.15	48.97	34.83	16.6	32.11
2006-04-04	18.14	9.86	45.24	41.57	42.52	35.41	21.01	30.54
2006-04-07	23.75	16.07	43.52	34.32	45.3	35.9	22.03	31.56
2006-04-10	23.87	15.63	37.66	33.65	37	33.41	15.16	28.05
2006-04-11	19.6	18.61	40.84	28.65	42.92	37.65	14.3	28.94
2006-04-12	19.06	12.66	37.3	27.34	28.87	31.98	13.84	24.44
2006-04-16	18.13	15.88	30.62	24.72	26.74	32.14	15	23.32
2006-04-26	14.52	11.77	31.39	27.39	29.22	27.38	16.39	22.58
2006-04-27	22.19	18.49	36.23	37.5	40.4	35.36	23.97	30.59
2006-04-28	19.15	14.13	38.5	36.3	35.32	33.97	15.29	27.52
2006-04-29	12.72	4	25.95	19.81	22.59	23.81	12.22	17.30
2006-04-30	12.15	4.79	27.11	23.98	26.72	24.98	11.8	18.79
2006-05-01	13.57	9.76	20.86	23.48	23.39	19.31	6	16.62
2006-05-07	13.66	7.5	24.35	25.01	29.34	23.2	13.13	19.46
2006-05-08	12.66	8.59	30.59	27.1	31.29	29.68	7.64	21.08
2006-05-09	17.66	7.32	24.23	29.02	31.52	26.38	9.62	20.82
2006-05-10	15.04	10.93	36.45	29.51	38.16	38.3	14.25	26.09
2006-05-11	22.86	20	30.72	23.56	27.35	27.59	12.81	23.56

Continua...

Continuación...

Anexo 3: Valores de concentración de NO₂ ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación

Fecha	NO2 Cotocollao	NO2 Carapungo	NO2 Belisario	NO2 Jipijapa	NO2 EI Camal	NO2 Centro	NO2 Guamani	NO2 Promedio
2006-05-21	15.14	5.96	28.21	18.96	27.87	19.23	17.36	18.96
2006-06-06	25.11	15.86	35.25	26.41	26.57	26.48	10.58	23.75
2006-06-09	21.55	11.88	33.5	20.25	30.93	29.44	16.72	23.47
2006-06-10	20.7	14.14	33.52	26.73	37.38	33.74	19.02	26.46
2006-06-11	18.91	12.88	27.87	22.76	32.17	23.07	8.3	20.85
2006-10-11	24.27	12.47	41.08	34.8	36.29	36.8	17.35	29.01
2006-10-13	20.26	7.5	33.41	27.83	29.67	30.85	16.64	23.74
2006-10-14	15.82	6.54	23.88	23.18	22.3	24.8	15.1	18.80
2006-10-24	22.6	18.54	40.32	37.83	34.06	37.83	21.23	30.34
2006-10-28	29.98	28.49	44.38	38.81	44.01	45	26.97	36.81
2006-10-30	22.02	23.7	44.08	37.29	41.96	44.02	24.98	34.01
2006-11-06	26.97	17.53	37.09	37.5	37.31	27.49	30.65	30.65
2006-11-07	26.48	14.42	41.47	33.12	39.73	42.83	22.89	31.56
2006-11-08	34.73	22.3	53.56	48.02	48.02	52.15	31.09	41.41
2006-11-09	34.65	21.47	48.9	46.51	53.99	52.67	34.61	41.83
2006-11-13	28.63	23.68	45.4	41.81	43.32	44.36	18.98	35.17
2006-11-14	21.72	11.33	35.18	29.09	28.01	35.18	21.86	26.05
2006-11-15	27.13	17.78	46.25	35.96	38.58	42.51	24.33	33.22
2006-11-16	22.36	14.58	40.5	32.82	39.06	36.57	22.95	29.83
2006-11-19	23.11	17.49	39.24	33.71	36.15	35.93	16.5	28.88
2006-11-21	21.67	16.97	39.24	35.46	37.45	36.45	19.49	29.53
2006-11-22	15.99	8.85	30.85	25.67	28.6	31.28	18.71	22.85
2006-11-23	16.87	12.91	33.85	22.82	30.62	29.91	15.87	23.26
2006-11-25	24.27	19.21	42.63	34.74	44.76	44.88	31.41	34.56
2006-11-26	16.24	15.71	34.01	22.34	36.23	31.18	23.34	25.58
2006-12-04	28.7	26.22	39.92	40.49	44.92	39.68	20.95	34.41
2006-12-06	27	22.14	42.88	36.21	42.04	34.72	23.32	32.62
2006-12-07	16.77	12.21	35.51	27.24	35.62	31.23	22.78	25.91
2006-12-08	20.97	14.58	36.76	27.25	34.19	31	16.94	25.96

Anexo 2: Valores de concentración de PM_{2.5} ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación

Fecha	PM2.5 Cotocollao	PM2.5 Carapungo	PM2.5 Belisario	PM2.5 Jipijapa	PM2.5 El Camal	PM2.5 Centro	PM2.5 Promedio
2005-04-25	7.89	5.82	12.53	14.85	10.9	10.17	10.36
2005-05-02	12.84	14.06	19.35	26.17	26.11	15.94	19.08
2005-08-23	42.42	43.33	44.47	42.45	52.94	43.74	44.89
2005-09-09	22.6	29.54	16.54	14.75	17.51	16.66	19.60
2005-10-05	23.21	17.38	29.49	26.44	58.12	21.67	29.39
2005-10-11	19.92	26.04	29.37	33.44	45.74	35.8	31.72
2005-10-21	30.84	27.25	34.01	32.96	40.71	36.7	33.75
2005-10-22	26.97	25.12	34.82	32.61	42.03	37.57	33.19
2005-11-07	37.04	10.68	19.42	14.8	18.2	16.4	19.42
2005-11-09	18.09	14.69	21.66	30.85	24.37	20.3	21.66
2005-11-11	11.65	8.45	28.74	17.05	16.98	19.43	17.05
2005-11-12	9.2	7.34	16	12.47	15.96	13.87	12.47
2005-11-15	20.43	17.73	30.06	26.87	35.87	30.28	26.87
2005-12-14	14.9	12.55	29.63	20.61	31.72	27.98	22.90
2005-12-15	22.35	19.3	32.68	27.34	35.16	33.27	28.35
2005-12-16	18.42	21.28	29.18	25.27	33.65	33.41	26.87
2005-12-17	18.63	14.72	23.82	21.41	23.82	23.13	20.92
2005-12-19	19.93	15.43	30.64	21.23	31.61	29.76	24.77
2005-12-22	13.5	14.32	28.94	22.45	27.73	25.99	22.16
2005-12-26	6.65	7.58	17.79	12.25	16.22	15.6	12.68
2005-12-27	19.81	17.14	27.1	26.5	39.4	25.87	25.97
2005-12-28	16.88	21.89	26.78	27.37	35.26	31.04	26.54
2005-12-31	25.21	29.38	28.63	30.26	49.35	39.85	33.78
2006-02-06	12.63	6.75	20.38	15.15	18.6	17.41	15.15
2006-02-22	15.27	8.82	23.67	18.08	21.89	20.76	18.08
2006-03-09	23.72	19.41	33.29	27.77	33.79	28.62	27.77
2006-03-10	20.5	15.12	25.74	21.33	23.21	22.06	21.33
2006-03-11	23.35	16.57	27.64	25.83	32.39	29.22	25.83
2006-03-12	14.09	10.42	15.56	15.01	18.87	16.12	15.01

Continua...

Continuación...

Anexo 3: Valores de concentración de PM_{2.5} ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación

Fecha	PM2.5 Cotocollao	PM2.5 Carapungo	PM2.5 Belisario	PM2.5 Jipijapa	PM2.5 EI Camal	PM2.5 Centro	PM2.5 Promedio
2006-03-13	15.65	15.14	28.75	25.78	41.64	27.74	25.78
2006-03-14	17.53	15.98	31.8	27.78	42.17	31.4	27.78
2006-03-15	16.31	10.12	21.26	18.64	24	21.5	18.64
2006-03-16	16	13.8	29.4	21.95	26.04	24.52	21.95
2006-03-17	14.5	11.57	26.64	19.75	22.62	23.43	19.75
2006-03-19	16.9	13.8	18.92	18.68	23.16	20.64	18.68
2006-03-20	22.15	19.39	25.79	26.01	33.4	29.3	26.01
2006-03-21	22.93	22.6	32.63	30.93	41.13	35.34	30.93
2006-03-23	14.49	10.61	25.14	19.85	26.17	22.83	19.85
2006-03-24	17.27	12.55	23.08	20.81	29.3	21.83	20.81
2006-03-25	17.38	13.02	20.02	19.13	24.39	20.86	19.13
2006-03-28	21.72	17.87	25.31	25.93	37.29	27.46	25.93
2006-04-02	22.12	22.96	22.28	22.55	29.56	24.03	23.92
2006-04-04	13.87	6.66	19.81	16.03	21.92	17.88	16.03
2006-04-07	19.58	14.39	21.45	19.31	22.83	18.29	19.31
2006-04-10	13.95	8.84	17.5	14.19	16.27	14.37	14.19
2006-04-11	17.87	21.38	26.48	24.75	30.83	27.19	24.75
2006-04-12	11.99	7.3	17.28	12.84	14.41	13.23	12.84
2006-04-16	16.23	13.72	15.81	16.18	18.8	16.34	16.18
2006-04-26	18.19	9.95	21.83	17.72	19.06	19.59	17.72
2006-04-27	17.38	13.91	23.69	21.84	27.46	26.78	21.84
2006-04-28	21.72	21.04	27.62	27.43	36.83	29.92	27.43
2006-04-29	15.63	11.86	20.39	16.42	17.21	17.03	16.42
2006-04-30	11.35	7.43	18.57	13.86	16.52	15.41	13.86
2006-05-01	15.52	11.32	16.83	15.19	17.66	14.62	15.19
2006-05-07	16.45	10.87	16.25	16.21	19.61	17.89	16.21
2006-05-08	15.95	10.92	22.9	19.4	23.52	23.7	19.40
2006-05-09	19.14	13.74	20.6	20.72	28.56	21.58	20.72
2006-05-10	22.06	14.89	29.56	24.9	29.6	28.41	24.90
2006-05-11	17.45	14.01	21.56	16.62	20.01	10.09	16.62

Continua...

Continuación...

Anexo 4: Valores de concentración de PM_{2.5} ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) en la atmósfera empleados en los análisis de correlación

Fecha	PM2.5 Cotocollao	PM2.5 Carapungo	PM2.5 Belisario	PM2.5 Jipijapa	PM2.5 EI Camal	PM2.5 Centro	PM2.5 Promedio
2006-05-21	13.03	7.13	13.76	12.56	14.99	13.88	12.56
2006-06-06	15.66	9.43	18.92	15.75	21.75	13	15.75
2006-06-09	15.99	7.39	18.04	14.62	17.73	13.93	14.62
2006-06-10	16.35	11.97	23.11	19	23.63	19.93	19.00
2006-06-11	18.15	14.11	16.93	18.33	23.26	19.18	18.33
2006-10-11	23.84	17.53	27.22	23.49	29.54	25.11	24.46
2006-10-13	26.52	17.01	19.74	15.2	19.99	15.73	19.03
2006-10-14	33.26	17.94	15.53	12.79	14.14	13.15	17.80
2006-10-24	22.76	21.92	27.47	26.67	31.05	28.31	26.36
2006-10-28	29.28	21.53	23.61	24.67	28.6	27.28	25.83
2006-10-30	22.08	19.12	29.88	22.61	26.17	24.76	24.10
2006-11-06	16.49	15.87	21.64	20.93	23.77	18.67	19.56
2006-11-07	28.14	14.85	21.14	14.53	23.08	18.87	20.10
2006-11-08	26.09	18.95	29.47	27.21	34.34	32.6	28.11
2006-11-09	36.67	23.65	31.96	33.54	50.96	42.04	36.47
2006-11-13	22	21.85	26.65	26.19	34.58	31.28	27.09
2006-11-14	12.46	12.47	20.51	15.15	18.44	17.66	16.12
2006-11-15	24.21	18.31	24.34	12.84	25.61	24.25	21.59
2006-11-16	17.47	21.14	22.5	19.88	24.53	18.73	20.71
2006-11-19	18.08	22.74	26.32	23.91	33.33	27.52	25.32
2006-11-21	15.64	21.22	25.74	23.09	31.68	27.71	24.18
2006-11-22	11.39	9.13	21.61	16.17	17.51	16.48	15.38
2006-11-23	11.9	15.46	17.97	12.27	16.49	15.76	14.98
2006-11-25	15.26	15.92	22.55	20.42	26.03	26.7	21.15
2006-11-26	11.92	16.12	18.81	13.74	21.1	17.23	16.49
2006-12-04	17.66	23.75	26.18	23.8	36.72	28.28	26.07
2006-12-06	16.65	19.15	22.89	18.56	25.77	19.97	20.50
2006-12-07	12.26	16.23	23.5	20.05	22.98	16.05	18.51
2006-12-08	15.18	19.35	25.18	23.09	27.64	19.47	21.65