

01177  
23



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

**CALIDAD DEL AIRE DE SANTA FE DE  
BOGOTA Y PROPUESTA DE UN INDICE  
DE CALIDAD**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL**

**P R E S E N T A:**

**I. C. MARIA CONSUELO TRIVIÑO PINZON**



**DIRIGIDO POR: M. C. VICENTE FUENTES GEA**

289654

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**2000**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres y a mis hijos  
mi amor y agradecimiento

## CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCION	
1. LA CALIDAD DEL AIRE EN AREAS URBANAS	3
1.1 LOS CONTAMINANTES DEL AIRES EN LA ATMOSFERA UBANA	3
1.2 INDICES DE LA CALIDAD DEL AIRE	12
2. EL CASO DE SANTAFE DE BOGOTA	22
2.1 FUENTES MÒVILES DE CONTAMINACIÒN EN SANTAFÈ DE BOGOTÁ	22
2.2 FUENTES FIJAS DE CONTAMINACIÒN EN SANTAFÉ DE BOGOTÁ	29
3. ANALISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD PARA LA FORMULACION DE UNA PROPUESTA DE INDICE DE CALIDAD DEL AIRE	31
3.1 LA RED DE MONITOREO	31
3.2 NORMATIVIDAD VIGENTE	34
3.3 METEOROLOGIA	36
3.4 CALIDAD DEL AIRE	48
3.5 IMPORTANCIA RELATIVA DE LOS CONTAMINANTES DEL AIRE EN LA CIUDAD	61
3.6 CALCULO DEL INDICE DE CONTAMINACION PARA SANTAFE DE BOGOTA	72
3.7 APLICACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DEL AIRE	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFIA	82

## LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Volúmenes de tráfico en las principales vías de Santa Fé de Bogotá	25
Tabla 2. Normas de emisión permisible para fuentes móviles con motor a gasolina	28
Tabla 3. Normas de emisión permisible para fuentes móviles con motor diesel	28
Tabla 4. Parámetros medidos en las estaciones de la red de monitoreo para octubre, noviembre y diciembre de 1997	33
Tabla 5. Unidades utilizadas en los registros de la red del DAMA	34
Tabla 6. Normatividad colombiana y normatividad corregida para Santa Fé de Bogotá	35
Tabla 7. Valores límite de referencia utilizados	35
Tabla 8. Datos meteorológicos, estación aeropuerto El Dorado	37
Tabla 9. Condiciones meteorológicas para octubre, noviembre y diciembre de 1997 frente a series aeropuerto El Dorado	38
Tabla 10. Clasificación de las velocidades máximas y mínimas reportadas de acuerdo con la escala Beaufort	40
Tabla 11. Distribución de la dirección del viento a diferentes horas del día	46
Tabla 12. Coeficiente de relación logaritmo de concentración – variable Z de acuerdo con la distribución acumulativa de frecuencias de los parámetros medidos	50
Tabla 13. Número de días con concentración de PM-10 superior a la norma	52
Tabla 14. Horas superando la norma de O3	56
Tabla 15. Valores medios obtenidos con relación a la normatividad colombiana	60
Tabla 16. Factores de ponderación de acuerdo con el No de días sobre la norma	69
Tabla 17. Factores de ponderación de acuerdo con el valor máximo absoluto	69
Tabla 18. Valores máximos encontrados para todos los parámetros durante el período de análisis	71
Tabla 19. Determinación de un índice de calidad del aire para Santafé de Bogotá	75
Tabla 20. Índice de calidad del aire para Santa Fé de Bogotá	75

## LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Esquema del uso del suelo en la ciudad de Santa Fe de Bogotá D. C.	23
Figura 2. Malla vial principal	26
Figura 3. Localización de las estaciones de la red de monitoreo del DAMA	32
Figura 4. Velocidad del viento	39
Figura 5. Rosa de los vientos, estación San Juan de Dios	42
Figura 6. Rosa de los vientos, estación Sony	42
Figura 7. Rosa de los vientos, estación Cazucá	42
Figura 8. Rosa de los vientos, estación Central de Mezclas	43
Figura 9. Rosa de los vientos, Escuela Colombiana de Ingeniería	43
Figura 10. Rosa de los vientos, estación El Bosque	43
Figura 11. Rosa de los vientos, estación Corpas	44
Figura 12. Rosa de los vientos, estación Negativa	44
Figura 13. Rosa de los vientos, estación CADE	44
Figura 14. Rosa de los vientos, estación RCN	45
Figura 15. Rosa de los vientos, estación Santo Tomás	45
Figura 16. Rosa de los vientos, estación Universidad Nacional	45
Figura 17. Estación Escuela Colombiana de Ingeniería, temperatura	49
Figura 18. Estación Central de Mezclas, temperatura	49
Figura 19. Humedad relativa. Estaciones ECI y Central de Mezclas	49
Figura 20. Presión atmosférica. Estaciones ECI y Central de Mezclas	49
Figura 21. Radiación solar. Estaciones ECI y Central de Mezclas	49
Figura 22. CO	53
Figura 23. PM-10	53
Figura 24. SO <sub>2</sub>	53
Figura 25. NO <sub>x</sub>	54
Figura 26. NO <sub>2</sub>	54

Figura 27. NO	54
Figura 28. CH <sub>4</sub>	58
Figura 29. NMHC	58
Figura 30. O <sub>3</sub>	58
Figura 31. Neblumo Cazucá	59
Figura 32. Neblumo Universidad Nacional	59
Figura 33. Neblumo Sony	59
Figura 34. Zonificación de la ciudad	62
Figura 35. Factores de ponderación NO <sub>2</sub>	62
Figura 36. Factores de ponderación CO	65
Figura 37. Factores de ponderación PM-10	66
Figura 38. Factores de ponderación SO <sub>2</sub>	67
Figura 39. Factores de ponderación O <sub>3</sub>	68
Figura 40. Factores de ponderación de los contaminantes de lá ciudad	70
Figura 41. Factores de ponderación por zona de la ciudad	70
Figura 42. Índice de calidad por CO	74
Figura 43. Índice de calidad por SO <sub>2</sub>	74
Figura 44. Índice de calidad por PM-10	74
Figura 45. Índice de calidad por NO <sub>2</sub>	74
Figura 46. Índice de calidad por O <sub>3</sub>	74
Figura 47. Valor horario del índice de calidad del aire para la zona norte, noviembre 15/97	76
Figura 48. Valor horario del índice de calidad del aire para la zona centro, noviembre 15/97	76
Figura 49. Valor horario del índice de calidad del aire para la zona sur, noviembre 15/97	76
Figura 50. Valor horario del índice de calidad del aire para la zona norte, diciembre 13/97	77
Figura 51. Valor horario del índice de calidad del aire para la zona centro, diciembre 13/97	77
Figura 52. Valor horario del índice de calidad del aire para la zona sur, diciembre 13/97	77

## LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1. Normatividad nacional de calidad del aire para Estados Unidos
- Anexo 2. Concentración y criterios de la escala PSI
- Anexo 3. Concentración y criterios de la escala IMECA
- Anexo 4. Método para el cálculo del IMECA
- Anexo 5. Normatividad mexicana aplicada para la determinación del IMECA
- Anexo 6. Datos promedio horario utilizados, calculados con base en los datos reportados durante la totalidad del periodo de muestreo
- Anexo 7. Cálculo del índice de calidad de aire de Bogotá, zona norte, noviembre 15 de 1997
- Anexo 8. Cálculo del índice de calidad de aire de Bogotá, zona centro, noviembre 15 de 1997
- Anexo 9. Cálculo del índice de calidad de aire de Bogotá, zona sur, noviembre 15 de 1997
- Anexo 10. Cálculo del índice de calidad de aire de Bogotá, zona norte, diciembre 13/97
- Anexo 11. Cálculo del índice de calidad de aire de Bogotá, zona centro, diciembre 13/97
- Anexo 12. Cálculo del índice de calidad de aire de Bogotá, zona sur, diciembre 13/97

## INTRODUCCIÓN

La evaluación y el control de la calidad del aire en complejas áreas urbano-industriales requiere, además del conocimiento de la relación entre los niveles de contaminantes y la salud, del conocimiento de la dinámica de los mismos frente a las características propias de cada urbe. Esto a su vez permite a las entidades responsables del control de la contaminación atmosférica, definir acciones tanto en el corto como en el mediano y en el largo plazo.

Por ser este un tema de creciente preocupación e importancia en la mayoría de las comunidades medianas y grandes, en algunas ciudades del mundo se han establecido "Índices de Calidad del Aire" que para el corto plazo, permiten la asociación de niveles de contaminación con medidas a tomar tanto a nivel del ciudadano común, como de los grandes generadores de contaminación y de quienes tienen bajo su responsabilidad el control de la contaminación del aire.

Este estudio se realizó con el propósito de conocer la situación específica de la ciudad de Santa Fe de Bogotá en la República de Colombia.

El Distrito Capital de Santa Fe de Bogotá, es el mayor centro socioeconómico de Colombia y cuenta con un importante sector industrial, dentro del contexto del país. La calidad del aire en la ciudad es un tema sobre el que en los últimos años, el gobierno del Distrito ha venido tomando interés creciente. Con el propósito de obtener un mayor conocimiento del comportamiento de los contaminantes del aire, el gobierno de la ciudad puso en operación a partir del mes de octubre de 1997, una red automática de monitoreo del aire. Los resultados registrados por la red constituyen una importante herramienta para la formulación, evaluación, revisión y eventual modificación de las políticas, planes y programas encaminados al control de la calidad del aire.

Utilizando los datos horarios arrojados por la red de monitoreo del aire de Santa Fe de Bogotá, durante los meses de octubre, noviembre y diciembre de 1997, así como la información estadística de la ciudad en los aspectos de demografía, industria, tránsito y transporte y meteorología, se estudió el comportamiento horario de los contaminantes del aire. Con base en lo anterior se determinó el peso relativo de cada uno, así como del peso relativo de las diferentes zonas de la ciudad. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y la experiencia de otros países en la formulación de índices de calidad del aire se propuso un Índice de Calidad del Aire para la ciudad.

Este estudio contribuye al conocimiento de la situación de la calidad del aire en Santa Fe de Bogotá y propone un "índice de calidad", como una herramienta adicional para su control. Sin embargo, se requieren estudios posteriores para conocer las tendencias de los contaminantes,

mejorar la información sobre fuentes de contaminación y contar con datos de meteorología de capas altas de los cuales en la actualidad no se dispone.

### **Objetivos y alcances generales**

Estudiar y conocer la calidad del aire de Santa Fe de Bogotá y proponer un índice de calidad de aire. El estudio se realizó con base en los datos generados por la red automática de monitoreo del aire, operada por el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente, DAMA, durante los meses de octubre, noviembre y diciembre de 1997, y fue complementado con información estadística de la ciudad sobre demografía, meteorología, tránsito y transporte y fuentes de emisión de contaminantes del aire.

### **Objetivos y alcances específicos**

1. Recopilar y analizar la información disponible en las diferentes entidades del Distrito Capital en cuanto a usos del suelo, demografía y situación de fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera puntuales y móviles.
2. Comparar las condiciones meteorológicas de los meses de octubre, noviembre y diciembre de 1997, con los valores medios de estos meses, reportados por las estaciones de la red hidrometeorológica nacional que opera el Instituto de Estudios Ambientales IDEAM dentro de la ciudad.
3. Analizar el comportamiento horario de la velocidad y dirección del viento durante el período de estudio, a partir de los datos de la red del DAMA.
4. Evaluar la información sobre la calidad del aire generada por la red del DAMA, para conocer el comportamiento de cada uno de los parámetros reportados a lo largo del día en cada una de las estaciones.
5. Comparar los niveles de contaminación encontrados en la ciudad, con la normatividad colombiana.
6. Proponer una zonificación de la ciudad con base en las condiciones meteorológicas, en calidad del aire y en la dinámica misma de las diferentes áreas de la ciudad.
7. Establecer la importancia relativa de los contaminantes del aire dentro de la ciudad.
8. Proponer un índice de calidad ambiental.

## 1. LA CALIDAD DEL AIRE EN ÁREAS URBANAS

### 1.1 LOS CONTAMINANTES DEL AIRE EN LA ATMÓSFERA URBANA

La atmósfera en las áreas urbanas presenta ciertas características derivadas de la densidad del área construida, de los materiales utilizados y de las fuentes de emisión al aire, de origen antropogénico, que son claramente diferenciables de las que presenta la atmósfera en áreas rurales (Canter, 1996, Strauss, 1995).

En las áreas urbanas es mayor la absorción de energía solar durante el día y se conserva durante más tiempo en la noche, que en las áreas rurales. Esto se debe al efecto de los materiales utilizados para la construcción y al área superficial de exposición. Adicionalmente los edificios, fábricas y casas pueden tener una influencia sobre la velocidad y dirección del viento.

Así mismo, en las grandes ciudades se presentan gran número de emisiones a la atmósfera principalmente de partículas, monóxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos como emisiones directas, y otros productos como son el ozono y otros oxidantes fotoquímicos, resultado de la fotooxidación y de las interrelaciones entre contaminantes primarios. Las características básicas de cada uno de estos contaminantes son las siguientes:

#### MONÓXIDO DE CARBONO

El monóxido de carbono es un gas incoloro e inodoro, químicamente inerte bajo condiciones normales (Wark, 1997, EPA, 1996, Peavy, 1985). Se forma como un producto intermedio de la reacción química entre combustibles carbonados y oxígeno. En las mezclas ricas, con una cantidad insuficiente de oxígeno, es un producto final de la combustión. En el caso de mezclas pobres el CO se puede producir ya sea porque la mezcla aire-combustible es defectuosa, de manera que se presente un comportamiento como de mezcla rica en combustible o porque en regiones a alta temperatura de la zona de combustión, el equilibrio químico hace que ocurra la disociación del CO<sub>2</sub> con el CO. En resumen, la relación aire-combustible, el grado de mezcla y la temperatura pueden generar de manera importante la formación de CO en la parte caliente de la zona de combustión. Por ser el monóxido de carbono producto de la combustión incompleta del combustible, al generar condiciones que promuevan la combustión total se presentará una reducción de la cantidad de CO en el gas de escape del motor. Según se aumenta la relación aire-combustible de 10 a 16 se presenta una reducción del CO en el gas de escape del 12% a casi cero.

Dentro de la producción total del gas por actividades antropogénicas es importante la contribución de los tubos de escape de los vehículos la cual puede generar altas concentraciones del gas, particularmente a nivel local, en áreas de congestión vehicular. Sin embargo, también son significativos los procesos industriales. La combustión en fuentes tales como calderas e incineradores es generadora importante de emisiones a la atmósfera.

El CO es un gas muy estable y su vida media en la atmósfera puede oscilar entre los dos y los cuatro meses. Puede oxidarse a CO<sub>2</sub> pero la tasa de conversión es lenta.

El efecto del monóxido de carbono sobre los materiales no es importante. Sobre las formas superiores de las plantas, existe afectación a concentraciones mayores de 100 ppm, en periodos de exposición entre una y tres semanas, siendo ésta una concentración muy alta en comparación con las que usualmente se registran aún en periodos más cortos. La concentración de CO en áreas urbanas se presenta en un rango entre 5 y 20 ppm, promedio diario.

Es clara la afectación del monóxido de carbono sobre la salud humana, ya que entra en el torrente sanguíneo y reduce el oxígeno enviado a los órganos y tejidos del cuerpo, causando daños fisiológicos y patológicos y finalmente la muerte. La hemoglobina, que en combinación con el oxígeno produce la oxihemoglobina, posee una afinidad mucho mayor con el CO para la formación de carboxihemoglobina, COHb. La presión parcial del O<sub>2</sub> requerido para la saturación completa de la hemoglobina, es de 200 a 250 veces mayor que la presión parcial requerida por el CO para la saturación completa de la hemoglobina. La cantidad de COHb es una función de la concentración de CO en el aire respirado.

La formación de COHb en la sangre es un proceso reversible ya que cuando se suspende la exposición el CO se libera. El nivel normal de COHb en el organismo es de 0.4%, el cual es producido dentro del cuerpo e independiente de las fuentes externas. La amenaza por la exposición a CO es más seria para las personas que sufren de enfermedades cardiovasculares. Los individuos sanos también son afectados pero sólo a niveles altos de exposición. A diferentes niveles de concentración de CO se presenta deterioro visual, reducción en la capacidad de trabajo, reducción de la destreza manual, disminución en las capacidades de aprendizaje y dificultad para realizar tareas complejas.

### ÓXIDOS DE NITRÓGENO

De los óxidos de nitrógeno, los que se presentan en cantidades significativas en la atmósfera son el N<sub>2</sub>O (óxido nitroso), NO (monóxido de nitrógeno) y el NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrógeno). El monóxido de nitrógeno es un gas incoloro y su concentración en el ambiente en general es menor que 0.5 ppm. A estas concentraciones no produce efectos. El dióxido de nitrógeno pertenece a la familia de gases altamente reactivos de los óxidos de nitrógeno y es activo en la formación del neblumo fotoquímico. Es un gas pardo rojizo visible a suficiente concentración. El NO<sub>2</sub> se forma por la oxidación de NO, por lo que no se considera contaminante primario; su afectación sobre la salud

humana sólo sucede a muy altas concentraciones: una exposición a una concentración de 3.0 ppm durante 45 minutos, produce dificultad en la respiración en personas normales en descanso. Es un fuerte agente oxidante que reacciona en el aire para formar ácido nítrico y nitratos orgánicos ácidos. Es un gas sofocante, y juega un papel primordial en las reacciones atmosféricas que producen el smog (Wark, 1997, EPA, 1996, Strauss,1995 Peavy,1985).

La mayor parte de las emisiones antropogénicas de estos gases se originan por el uso de combustibles fósiles, específicamente cuando éstos son quemados a altas temperaturas. En su mayoría, las fuentes móviles están constituidas por los tubos de escape de los vehículos mientras que las fuentes fijas de mayor importancia son las centrales termoeléctricas y las calderas industriales.

El nitrógeno del combustible, o nitrógeno químicamente enlazado en los hidrocarburos combustibles, es una fuente importante en la formación de NO. La oxidación del nitrógeno del combustible es rápida y las concentraciones en exceso del equilibrio ocurren en las cercanías del frente de flama.

Los efectos del bióxido de nitrógeno sobre la salud se observan como irritación de los pulmones y baja resistencia a infecciones respiratorias. Los efectos de exposiciones cortas no son claros, sin embargo, la exposición continua o frecuente a concentraciones más altas de las que normalmente se encuentran en el aire, pueden incidir en enfermedades respiratorias agudas en niños.

## PARTÍCULAS

El material particulado incluye partículas sólidas o líquidas mayores que las moléculas individuales. La clasificación de las partículas se puede hacer considerando su tamaño o considerando su composición (Wark,1997, Peavy,1985).

El tamaño de las partículas arrastradas por el aire en general se encuentra en el rango entre 0.001 a 500  $\mu\text{m}$ . El movimiento de las partículas con tamaños menores de 0.1 $\mu\text{m}$  es similar al de las moléculas. En el rango entre 1 y 20 $\mu\text{m}$  la tendencia es a seguir el movimiento del gas que las transporta. Partículas mayores del rango anterior, tienen velocidades de asentamiento suficientemente grandes para que sea muy corto el tiempo de arrastre por el aire.

El origen de las partículas menores de 1 $\mu\text{m}$  es principalmente la condensación, mientras que tamaños mayores resultan de la combustión y de la pulverización. En el proceso de la combustión se forman partículas de cualquiera de las siguientes formas:

- Producción de hollín como resultado de la combustión parcial de combustibles fósiles
- Escape de ceniza muy fina si intervienen aspersiones de combustibles
- Vaporización de materiales que posteriormente se condensan produciendo partículas entre 0.1 y 1  $\mu\text{m}$

- Procesos mecánicos que pueden liberar cenizas o partículas de combustible mayores o iguales a  $1\ \mu\text{m}$
- Reacciones químicas que ocurren en el proceso de la combustión que producen partículas de cúmulos moleculares inestables de corta duración por debajo de  $0.1\ \mu\text{m}$ .

Mediante la pulverización o triturado en seco se producen partículas cuyo diámetro se encuentra

Dentro de las fuentes fijas, las mayores generadoras de partículas son las fuentes de producción de energía que consumen carbones bituminosos y lignitos. Dentro del sector industrial las fábricas de hierro y acero, metales no ferrosos, refinerías de petróleo, cemento Portland, fábricas de papel Kraft, manufactura de ácidos fosfórico y sulfúrico, carbón de coque, vidrio y fibra de vidrio así como la industria alimenticia son fuentes reconocidas de importantes cantidades de emisiones de partículas a la atmósfera.

Dentro de las fuentes móviles, la materia particulada emitida por vehículos con motor de gasolina se compone de carbón y aerosoles de hidrocarburos producto de la combustión incompleta y ceniza metálica de combustibles que contienen compuestos de plomo antidetonantes. Los motores diesel generan carbón y aerosoles de hidrocarburos como resultado de la combustión incompleta.

Uno de los efectos más notorios de las partículas en la atmósfera es la reducción de la visibilidad como resultado de los fenómenos de absorción y dispersión de la luz por los materiales sólidos y líquidos arrastrados por el aire. Como la visibilidad se altera por las partículas que se forman por reacciones de la fase gaseosa se sabe que grandes concentraciones de bióxido de azufre, vapor de agua y ozono influyen en las características de absorción y transmisión de la atmósfera. Los efectos pueden alterar la seguridad pero también tiene efectos psicológicos sobre los individuos.

El efecto de las partículas sobre los materiales dependerá de la composición química y el estado físico, ya que éstas pueden ser químicamente inertes pero absorber de la atmósfera sustancias químicamente activas (Wark,1997). También puede ocurrir la combinación de sustancias químicamente activas. La corrosión es uno de los posibles efectos de las partículas sobre los materiales como daños químicos directos por corrosión intrínseca o por sustancias químicas corrosivas adsorbidas o absorbidas por partículas inertes emitidas a la atmósfera.

Se conocen efectos de las partículas sobre las plantas, en especial de las que contienen fluoruros y óxidos de magnesio, causando la disminución del crecimiento. A su vez, el consumo de plantas que contengan partículas tóxicas, por parte de animales, puede causar envenenamiento.

En cuanto a los efectos sobre la salud humana, éstos están ligados al tamaño de las partículas. Aproximadamente el 40 por ciento de las partículas entre  $1$  y  $2\ \mu\text{m}$  que acceden al aparato respiratorio, se depositarán allí. Las partículas entre  $0.25$  y  $1\ \mu\text{m}$  muestran decrecimiento en el porcentaje de retención ya que son inhaladas y exhaladas. Sin embargo, partículas menores a  $0.25\ \mu\text{m}$  muestran nuevamente incremento en el porcentaje retenido por el movimiento Browniano

que genera colisiones entre ellas. Para partículas entre de 2 y 10µm, el porcentaje de retención disminuye debido a los mecanismos de defensa del aparato respiratorio.

Las partículas pueden tener un efecto tóxico debido a sus características intrínsecas o a su capacidad de actuar como conductor de una sustancia tóxica absorbida. Las partículas pueden interferir con los mecanismos que despejan el aparato respiratorio.

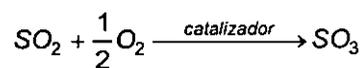
Se ha detectado que la exposición a partículas en presencia de concentraciones elevadas de otros contaminantes como el SO<sub>2</sub> produce mayores efectos sobre la salud que la exposición separada a cada contaminante. Si bien los óxidos de azufre contribuyen a incrementar los problemas de partículas respirables y de visibilidad por medio de la formación de sulfatos y la aglomeración de otros gases y partículas con los que interactúan, no se ha podido diferenciar los efectos de los contaminantes en esas situaciones.

### BIOXIDO DE AZUFRE, SO<sub>2</sub>

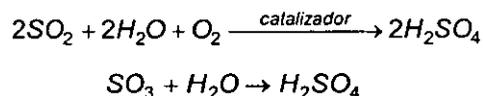
El bióxido de azufre es un gas incoloro, no flamable y no explosivo con olor sofocante a concentraciones mayores a 0.5 ppm. Es altamente soluble en agua y se estima que permanece en el aire entre 2 y 4 días, por lo que los problemas de contaminación que genera pueden ser localizados a grandes distancias de las fuentes.

El azufre es un componente de todos los petróleos y carbones naturales con una composición que varía de 0.1 a más del 5%. La cantidad de SO<sub>2</sub> emitida será función de la naturaleza y origen de los combustibles fósiles.

Este elemento es relativamente estable en la atmósfera y actúa como agente reductor o como agente oxidante. Por medio de reacciones fotolíticas o catalíticas con otros contaminantes atmosféricos, puede producir SO<sub>3</sub>, aerosoles y sales de ácido sulfúrico. En presencia de un óxido metálico como catalizador en la atmósfera, especialmente partículas y óxidos de nitrógeno, se presenta la siguiente reacción,



Otras reacciones frecuentes en la atmósfera con alto contenido de humedad son las siguientes,



La primera de estas dos reacciones ocurre en forma rápida en presencia de sulfatos, cloruros de hierro y manganeso. Estas sales metálicas actúan como catalizadores de la reacción. Los aerosoles de ácido sulfúrico que se forman reducen la visibilidad además de ser altamente reactivos.

El  $\text{SO}_2$  puede reaccionar también con el agua para formar  $\text{H}_2\text{SO}_3$ .

Los óxidos de azufre en combinación con las partículas y la humedad del aire producen importantes efectos perjudiciales sobre la salud (Wark, 1997). Los efectos de los compuestos azufrados en el aire son importantes en la incidencia sobre la visibilidad y el deterioro de materiales.

Los aerosoles originados de las reacciones fotoquímicas entre el  $\text{SO}_2$ , las partículas, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos presentes en la atmósfera son responsables en un porcentaje importante de la neblina atmosférica. Uno de los productos más importantes es el ácido sulfúrico que dispersa la luz y reduce la visibilidad. El aumento de  $\text{SO}_2$  unido al aumento en la humedad relativa produce un incremento de aerosoles lo que genera una disminución en el rango visual.

Sobre los materiales, la concentración de  $\text{SO}_2$  influye, de manera directa, en el tiempo de secado de las pinturas, pero su principal efecto es la contribución a los procesos de corrosión.

La afectación sobre las plantas es aguda o crónica. Aguda cuando se expone a altas concentraciones en períodos cortos de tiempo y crónica cuando las concentraciones son bajas pero los períodos de exposición largos. En cada caso el tipo de daños a la vegetación es diferente. Exposiciones agudas generan muerte en los tejidos de las hojas. Las exposiciones crónicas producen manchas en las mismas.

Los efectos sobre la salud dependen de la relación concentración – duración de la exposición y de la relación concentración de  $\text{SO}_2$ , partículas y humedad relativa. Esto último se refiere especialmente a las exposiciones a corto plazo. Es así como se han establecido efectos sobre la salud a determinadas concentraciones de partículas y de  $\text{SO}_2$  simultáneamente, que van desde el aumento en la incidencia de enfermedades respiratorias hasta la ocurrencia de un excesivo número de muertes. Tanto el ácido sulfúrico como el bióxido de azufre tienden a irritar las membranas mucosas del tracto respiratorio y fomentan el desarrollo de enfermedades respiratorias crónicas como bronquitis y enfisema pulmonar.

## HIDROCARBUROS

Desde el punto de vista de calidad del aire las principales características de los hidrocarburos son las siguientes (Peavy, 1985):

### - *Hidrocarburos alifáticos*

Los alcanos en general son inertes y no activos a las reacciones fotoquímicas de la atmósfera. Los alquenos u olefinas son altamente reactivos en la fotoquímica atmosférica, por lo cual son muy importantes. Dentro de este grupo se encuentra el etileno el cual en presencia de luz solar reacciona con el bióxido de nitrógeno a altas concentraciones para formar peroxiacetil nitrato y

ozono. El tercer grupo de estos hidrocarburos está constituido por los alquinos que son altamente reactivos pero no frecuentes en la atmósfera.

El etileno, que se encuentra en la atmósfera de grandes áreas urbanas, causa afectación sobre ciertos tipos de plantas.

- *Hidrocarburos aromáticos*

Son biológica y bioquímicamente activos y potencialmente carcinógenos. Los hidrocarburos polinucleares que se emiten por el escape de los vehículos, son responsables del aumento de incidencia en el cáncer de pulmón en grandes áreas urbanas.

Las principales fuentes antropogénicas de hidrocarburos son los vehículos de transporte por la combustión incompleta, conjuntamente con evaporación de la gasolina de los tanques y carburadores, y la industria ya sea por procesos industriales o por la combustión. Las gasolinas son mezclas de parafinas, olefinas, naftalenos y compuestos aromáticos formulados en función de obtener ciertas características. Los diferentes tipos de hidrocarburos presentan diferentes puntos de ebullición, temperaturas de ignición y características de combustión. Al quemar diferentes gasolinas en un motor dado, se producen diferentes hidrocarburos no consumidos entre los productos del escape. Con la misma gasolina en diferentes tipos de motores, los productos del escape también son diferentes. Todo lo anterior aunado a la gran cantidad, más de doscientos, de hidrocarburos diferentes entre los productos del escape de una gasolina hace muy difícil pronosticar los productos específicos. Adicionalmente, los hidrocarburos no consumidos poseen potenciales variables para la formación de neblumo.

Muchos compuestos orgánicos presentes en la atmósfera son fotoquímicamente reactivos. La absorción de la radiación solar por estos contribuye a la producción de radicales libres que formarán compuestos nuevos. La cadena de reacciones se inicia con la fotooxidación de hidrocarburos por el oxígeno atómico, el cual se ha formado por la fotodescomposición del bióxido de nitrógeno. Entre los productos más importantes de estas reacciones están los aldehídos, cetonas, CO, CO<sub>2</sub>, nitratos orgánicos y oxidantes entre los que se incluyen el ozono y el bióxido de nitrógeno.

Prácticamente cualquier hidrocarburo, con la excepción del metano, es susceptible de ser fotooxidado en la presencia de NO<sub>x</sub> para tomar alguna forma oxidante siempre que exista una relación adecuada entre el HC y el NO<sub>x</sub> y que el tiempo de irradiación sea suficientemente largo.

Los hidrocarburos no afectan de manera importante los materiales. Sobre las plantas se sabe que el etileno inhibe su crecimiento. Sobre la salud humana algunas clases de hidrocarburos aromáticos polinucleares son carcinógenos. Es importante el papel de los hidrocarburos no quemados en combinación con otros contaminantes y en presencia de luz solar en la formación de oxidantes fotoquímicos con sus efectos sobre la salud humana.

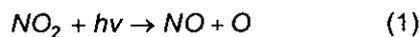
## OZONO

El ozono no se emite directamente en el aire por fuentes específicas sino que se origina a partir de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  y compuestos orgánicos volátiles en presencia de la luz solar (García, 1997, Wark, 1997, Reyes, 1992). Existen muchas fuentes de estos tipos de gases entre los cuales se incluyen vapores de gasolina, solventes químicos y productos de la combustión. Las emisiones de  $\text{NO}_x$  y de VOC originadas en motores de vehículos y fuentes fijas pueden ser transportadas a cientos de kilómetros de su origen y producir altas concentraciones de ozono sobre grandes regiones.

Los efectos que sobre la salud genera el ozono varían con la concentración y período de exposición. Se ha observado que para períodos entre 6 y 7 horas, individuos saludables expuestos a niveles relativamente bajos presentan reducción en la función pulmonar, al realizar ejercicio moderado. Esto puede ir acompañado de otros síntomas como dolor en pecho, tos, náuseas y congestión pulmonar. Algunos estudios en ciudades de los Estados Unidos han puesto en evidencia la relación entre niveles elevados de ozono y aumento en hospitalizaciones por problemas respiratorios.

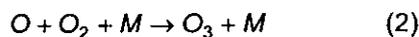
En áreas urbanas donde se tienen grandes cantidades de emisiones tanto vehiculares como industriales, son emitidas a la atmósfera grandes cantidades de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}$ , que son agentes reductores y de hidrocarburos que no tienen fuerza oxidante. Existen algunos hidrocarburos que con el  $\text{NO}$ , en presencia de luz solar pueden ocasionar la formación de ozono.

El ozono cerca de la superficie terrestre tiene como origen el ciclo fotolítico del  $\text{NO}_2$  (EPA, 1996). El  $\text{NO}$  liberado por fuentes estacionarias y móviles tiende a oxidarse a  $\text{NO}_2$ , el cual es muy reactivo fotoquímicamente. Para la radiación por debajo de 0.38  $\mu\text{m}$  la reacción de disociación del  $\text{NO}_2$  es

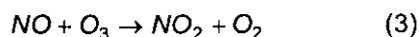


Esta es una reacción fotoquímica importante ya que produce oxígeno monoatómico,  $\text{O}$ , que es altamente reactivo.

El oxígeno monoatómico se combina con el  $\text{O}_2$ , en presencia de un tercer cuerpo  $\text{M}$  mediante la siguiente reacción para formar el ozono



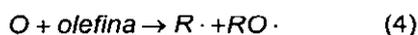
A partir de la reacción anterior, el ozono oxida el monóxido de nitrógeno a dióxido de nitrógeno así:



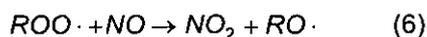
Estas reacciones son muy rápidas y su combinación debería tender a mantener un nivel bajo y constante de la concentración de ozono. Sin embargo, en la realidad las especies involucradas en este ciclo interactúan con otras especies presentes en la atmósfera. Los hidrocarburos contribuyen al aumento de la complejidad de las reacciones atmosféricas. Si bien la fotoquímica atmosférica inferior aún no está totalmente comprendida se han identificado mecanismos que producen aumento en las concentraciones de  $\text{NO}_2$  y  $\text{O}_3$ . Una de ellas es que una parte del oxígeno atómico formado por la reacción (1) reacciona con diversos compuestos orgánicos para formar radicales libres orgánicos e inorgánicos. Ocurre lo mismo para el ozono formado en la reacción (2). Como resultado de esto se aumentan el número de compuestos y de reacciones involucradas en la formación del ozono.

Además de todo lo anterior, es importante notar el papel que juegan los hidrocarburos en el aumento en las concentraciones de  $\text{NO}_2$  y de  $\text{O}_3$ .

Una pequeña parte del oxígeno monoatómico formado en la reacción (1) y del ozono formado en la reacción (2) pueden reaccionar con compuestos orgánicos para formar radicales libres, orgánicos e inorgánicos, de acuerdo con las siguientes reacciones, escritas según términos de compuestos olefínicos,



En estas reacciones se forman radicales libres de los cuales el  $\text{HCO}$  es contaminante. Los compuestos  $\text{ROO} \cdot$  oxidan el  $\text{NO}$ :



Esta reacción es básica para el aumento de los niveles de la formación posterior del ozono y que se dispone de una fuente adicional de  $\text{NO}_2$ , a la ya citada en la reacción (3).

## 1.2 INDICES DE LA CALIDAD DEL AIRE

### Definición

Un índice de contaminación del aire puede ser definido como un sistema que transforma, de manera ponderada, el valor de la concentración de los parámetros o contaminantes considerados, a un número adimensional. El resultado puede ser único para todo el grupo de contaminantes, o ser obtenido de manera parcial para cada uno.

El índice está compuesto por algoritmos, a través de los cuales se obtienen como resultado expresiones simples y comparables entre sí. Debe ser de fácil entendimiento para el público en general puesto que, su principal objetivo es informar a la población sobre el nivel de contaminación presente. Un índice compara los niveles de toxicidad de los diferentes contaminantes y los relaciona con efectos sobre la salud.

### Aspectos relativos al desarrollo de índices de calidad

La necesidad de contar con un sistema sencillo que permitiera dar un fácil seguimiento a la calidad del aire, en áreas urbanas principalmente, llevó al desarrollo y formulación de gran variedad de índices de calidad en diferentes países. Sin embargo, la búsqueda de las características ideales para la definición de uno que pudiera ser propuesto a nivel federal en los Estados Unidos de Norteamérica, condujo al desarrollo de un estudio realizado por Ott y Thom (1976), como resultado del cual, se estableció una metodología para la clasificación de índices y se concluyó sobre las principales características que éste debe tener.

La implementación de un índice de calidad responde a la necesidad de informar diariamente al público sobre la calidad del aire, de manera que, las personas cuya salud sea particularmente sensible de ser afectada puedan tomar las medidas necesarias, y también, facilite a las entidades responsables del control de la contaminación, la puesta en marcha de los programas específicos con la participación oportuna y consciente de la comunidad.

Los aspectos básicos a definir en la formulación de un índice son la selección de parámetros, el método de comparación de los niveles de toxicidad o ponderación del efecto de los mismos, el tipo de algoritmo a utilizar, el empleo de puntos de referencia sobre efectos a la salud y criterios de episodio (niveles de alerta, peligro y emergencia), y el reporte final de la información. Sin embargo, la determinación de cómo ponderar el efecto de los contaminantes ha sido uno de los principales problemas. Sobre el particular se han propuesto diferentes alternativas, dentro de las cuales se pueden citar índices tales como PINDEX (Pollutant Index), ORAQI (Oak Ridge Air Quality Index), MAQI (Matri Air Quality Index), EVI (Extreme Value Index), que llevaron históricamente a la formulación del PSI (Pollutant Standard Index), actualmente utilizado en los Estados Unidos (Ott.1976).

El PINDEX, asumía como factores de ponderación los recíprocos de las normas de calidad propuestas para California (1969), expresadas en microgramos por metro cúbico. El PINDEX se obtenía como resultado de la suma de las concentraciones de HC, CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, partículas, más un factor sinérgico de óxidos de azufre y partículas

$$PINDEX = \frac{HC}{19300} + \frac{CO}{7250} + \frac{SO_x}{1430} + \frac{NO_x}{514} + \frac{PM}{375} + \frac{O_2}{214} + SYN$$

donde,

$$SYN = \frac{SO_x}{1430} \text{ ó } \frac{PM}{375}$$

utilizando el menor de éstos. A su vez, el factor de ponderación de partículas (1/375) fue obtenido por medio de la conversión, a concentración en masa, de la norma de visibilidad utilizando la ecuación de Charlson,

$$\text{Concentración en masa} = \frac{1.8 \times 10^6}{\text{Visibilidad (m)}}$$

Otras consideraciones fueron necesarias para poder utilizar la fórmula del PINDEX. Los datos de NO<sub>x</sub>, HC y Ox fueron modificados sobre la base de que tanto los óxidos de nitrógeno como los hidrocarburos crean oxidantes en una base molar uno a uno controlada por la radiación solar. El proceso es el siguiente:

- Convertir NO<sub>x</sub>, HC y Ox a µmol/m<sup>3</sup>
- Comparar los valores de NO<sub>x</sub> e HC y elegir el menor
- Calcular un factor de creación de oxidantes como el producto del valor menor entre NO<sub>x</sub> e HC x 0.0006 x radiación solar(cal/(cm<sup>2</sup> x día))
- Estimar exceso de HC y NO<sub>x</sub>
- Ponderar las concentraciones de HC, NO<sub>x</sub> y Ox

Si bien algunas de estas consideraciones resultan controvertibles, el PINDEX fue una base para el posterior desarrollo de otros índices.

El índice ORAQI fue propuesto utilizando como factores de ponderación las normas ambientales de 24 horas. Consideraba los parámetros de partículas totales en suspensión, Ox, SO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> y CO. El resultado se definió como la suma de éstos. Un valor de ORAQI de 10 se refiere a las concentraciones de fondo de los parámetros involucrados. Un valor de 100 se refiere a las normas federales de calidad de aire de Estados Unidos (NAAQS).

La ecuación para el cálculo de este índice es la siguiente:

$$ORAQI = \left( 5.7 \times \sum \left( \frac{C_i}{S_i} \right) \right)^{1.37}$$

donde,

$C_i$  = concentración observada del contaminante  $i$

$S_i$  = norma del contaminante para 24 horas

Otros índices, tales como el MAQI y el EVI fueron propuestos para estudiar tendencias en el largo plazo.

El índice MAQI, para su cálculo utiliza la relación entre las concentraciones horarias máximas y anuales con relación a la normatividad de Estados Unidos. En este caso, primero se definen índices individuales, por contaminante. El resultado definitivo del MAQI es igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los índices individuales.

Los índices parciales se obtienen de la siguiente manera:

$$I_{CO} = \left( \left( \frac{C_S}{S_S} \right)^2 + \sigma \left( \frac{C_1}{S_1} \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$I_{SO_2} = \left( \left( \frac{C_a}{S_a} \right)^2 + \sigma_1 \left( \frac{C_{24}}{S_{24}} \right)^2 + \sigma_2 \left( \frac{C_3}{S_3} \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$I_{PM} = \left( \left( \frac{C_a}{S_a} \right)^2 + \sigma \left( \frac{C_{24}}{S_{24}} \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$I_{O_x} = \frac{C_i}{S_i}$$

$$I_{NO_2} = \frac{C_a}{S_a}$$

donde,

- C se refiere a concentraciones de contaminantes
- S se refiere a las normas
- $\sigma, \sigma_1, \sigma_2 = 1$  si  $C/S \geq 1$  ó 0 en los otros casos
- los subíndices numéricos son promedios horarios
- el subíndice "a" es el promedio anual

$$MAQI = \left( I_{CO}^2 + I_{SO_2}^2 + I_{PM}^2 + I_{NO_2}^2 + I_{O_x}^2 \right)^{1/2}$$

Cuando el valor final del MAQI es menor o igual a 1 indica que ninguna de las normas ha sido excedida. Un valor mayor a 3 indica que al menos una de las normas se ha excedido.

Otro índice de tendencias al largo plazo, EVI, para su cálculo utiliza información de concentraciones promedio a corto plazo. El EVI, así como el MAQI, es el resultado de la raíz cuadrada de la sumatoria de los cuadrados de los índices parciales. En este caso estos índices parciales se calculan de la siguiente manera:

$$I_n = \left( \sum_j \frac{\left( \sum_i \sigma_i (C_{nj})_i \right)}{S_{nj}} \right)^2$$

$$EVI = \left( I_{CO}^2 + I_{SO_2}^2 + I_{PM}^2 + I_{O_3}^2 \right)^{1/2}$$

Donde,

- $C_{nj}$  es la concentración de un parámetro en un término corto definido
- $S_{nj}$  es la norma correspondiente a un parámetro en un término corto definido
- "j" es el promedio de concentración de un término corto (1,2,8,24 hr)
- "i" es el número de promedios "j" durante un año
- $\sigma = 1$  si  $C/S \geq 1$  ó 0 en los otros casos

#### Clasificación de los índices de calidad del aire

En el trabajo realizado por Ott y Thom (1976), se estudiaron tanto índices reportados en la literatura como índices propuestos por agencias encargadas del control de la contaminación del aire de Estados Unidos y Canadá. Algunos de estos índices estaban en uso. La población estudiada incluyó las cincuenta y cinco agencias de control más grandes de Estados Unidos tanto metropolitanas como estatales. También se incluyeron las agencias de control de algunas provincias canadienses en las que, al igual que en Estados Unidos, se contara con un equipo de más de 10 personas.

Para analizar y comparar los índices estudiados fue necesario establecer criterios para la clasificación de los mismos considerando los siguientes aspectos:

#### 1. Número de variables

Esto es el número de parámetros incorporados al índice.

## 2. Método de cálculo

Los métodos de cálculo se clasifican en cuatro clases. Los tres primeros involucran algún tipo de ecuación, mientras que el cuarto presenta las concentraciones en unidades estándar:

### a. Relaciones no lineales

Este método consiste en funciones exponenciales con coeficiente, u otras relaciones no lineales. Los coeficientes pueden ser o no constantes pero la relación contiene al menos una variable elevada a un exponente.

### b. Funciones lineales segmentadas

En este caso el cálculo se realiza por medio de funciones lineales de una o más variables con coeficientes no constantes. Las pendientes varían entre rangos de concentración del contaminante.

### c. Funciones lineales

Se trata de funciones lineales de una o más variables en las cuales la pendiente  $k_i$  de cada variable  $i$  permanece constante.

### d. Unidades estándar

Algunos índices no utilizan ningún algoritmo para convertir las concentraciones a números adimensionales, si no que las presentan en unidades estándar.

## 3. Modo de cálculo

El modo diferencia aquellos índices no combinados de aquellos que si lo son.

Se denominan índices no combinados aquellos que reportan resultados parciales por parámetro y aquellos que reportan únicamente el valor máximo encontrado para un parámetro en comparación con los demás. Los índices combinados o agregados conducen a un solo valor a través de alguna manipulación matemática.

Como consecuencia de lo anterior, la clasificación del índice de acuerdo con el modo de cálculo es:

### a. Individual

Un valor es reportado para cada una de las variables incluidas en el índice

### b. Máximo

Sólo se reporta el valor correspondiente al parámetro que haya tenido el valor máximo.

### c. Combinado

Las variables son relacionadas entre sí a través de alguna función definida.

## 4. Categorías descriptivas

Este aspecto se refiere a los rangos de valores del índice, a cada uno de los cuales se le asocia una cualidad. La descripción de las categorías puede basarse en los estándares, en episodios criterio u otras bases establecidas arbitrariamente:

a. Estándares

La descripción de categorías basada en los estándares asocia valores por encima y por debajo de aquel que establece la normatividad como el máximo admisible en un período definido de tiempo.

b. Estándares y episodios criterio

Además de lo anterior, los valores correspondientes a rangos por encima de la norma pueden considerar otros puntos de quiebre con relación a episodios criterio, es decir niveles de alerta, emergencia y peligro, si están éstos contemplados en la reglamentación.

c. Arbitrarios

Se pueden emplear otros criterios para determinar categorías con el fin de cumplir fines específicos, pueden haber sido determinados empírica o semiempíricamente.

Una vez definidas las bases para la clasificación de los índices, fue necesario diseñar una nomenclatura con el fin de facilitar la identificación de éstos. Esta nomenclatura consiste en un código, compuesto por cuatro caracteres, cada uno de los cuales refleja una de las características arriba citadas.

El primer carácter es el número de contaminantes incluidos. El segundo carácter se refiere al método de cálculo (correspondiendo una A a funciones no lineales, una B a funciones lineales segmentadas, una C a funciones lineales y una D a concentraciones reportadas en unidades estándar). El tercer carácter es el modo de cálculo (1 para índices que reportan de manera individual cada parámetro, 2 para aquellos que reportan el valor máximo y 3 para índices combinados). Por último el cuarto carácter se basa sobre las categorías descriptivas (correspondiendo A a aquellas basadas en los estándares, B, aquellas basadas en estándares y concentraciones con niveles de riesgos asociados y C aquellas que se han determinado arbitrariamente).

De un índice cuyo código es por ejemplo **3 B 2 B** se deduce que incluye tres parámetros, utiliza para su cálculo funciones lineales segmentadas, reporta el valor máximo encontrado, y sus términos descriptivos se basan en la normatividad, incluyendo los niveles de daño significativo.

De acuerdo con los resultados obtenidos por Ott-Thom (1976), una vez clasificados los índices estudiados, se buscaron las características más frecuentemente encontradas en éstos, con el propósito de que el índice que se propusiera reflejara la estructura mas usada. El estudio llegó a la conclusión de que tal índice se clasifica como **5B2B**, es decir: incluye cinco contaminantes, siendo éstos CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y PST (partículas suspendidas totales), utiliza funciones lineales segmentadas, reporta del modo máximo, cuenta con cuatro categorías descriptivas basadas en la norma federal y en los criterios episodio, utiliza las palabras usadas con mayor frecuencia como son Buena, Moderada, Insalubre e Insatisfactoria.

Para el uso a nivel federal de los Estados Unidos, el estudio propuso un índice 6B2B, estos es, considera seis variables (CO, SO<sub>2</sub>, PST , PST x SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>), incorpora funciones lineales segmentadas, se calcula usando el modo máximo, utiliza como puntos de quiebre las normas federales (NAAQS), los criterios de episodio y niveles de daño significativo, y por último, incluye cuatro categorías descriptivas.

#### Características de un índice de calidad del aire

De acuerdo con el sistema Ott-Thom las características de un índice de calidad del aire son al menos las siguientes:

*- Ser fácilmente entendido por el público*

Para esto las concentraciones en unidades estándar deberán ser transformadas y reportadas como números adimensionales, teniendo en cuenta que las bases sobre las que se plantea la conversión deben ser idénticas para todos los parámetros.

*- Incluir los parámetros más importantes y poder ser ampliado para incluir otros más.*

Deben ser incluidos aquellos contaminantes identificados como importantes, es decir, aquellos considerados en la normatividad y/o aquellos sobre los que se tenga información sobre la relación concentración-efecto umbral y niveles de daño significativos.

La estructura del índice debe ser flexible de manera que si un nuevo parámetro es incluido su estructura no sea modificada.

*- Ser referido a estándares de calidad y a objetivos*

Los rangos establecidos para los índices deben relacionar los criterios de alerta, peligro y emergencia así como los niveles de daño significativo, establecidos en la normatividad. Esto provee un sistema uniforme tanto en cuanto a la información al público como en cuanto a procedimientos en casos de episodios de contaminación.

*- Ser calculado de manera sencilla sobre supuestos razonables*

La concentración de los contaminantes debe ser fácilmente convertida en su correspondiente valor como índice, utilizando ecuaciones sencillas apropiadas de valores de índices contra concentración de contaminantes.

*- Tener como base premisas científicas razonables.*

Como el índice está directamente relacionado con las normas, su base es tan sólida como las bases científicas sobre las cuales los estándares y criterios episodio son establecidos.

*- Ser consistente con los niveles de contaminación observados*

Los índices pueden mostrar inconsistencia con los niveles de contaminación observados, si concentraciones altas son enmascaradas con concentraciones bajas. Por lo anterior, el índice debe calcular separadamente valores para cada contaminante, de manera que sea posible reportar cada uno de manera separada.

- *Ser espacialmente significativo*

Este aspecto depende de la selección y manipulación de los datos previo al cálculo del índice. La concentración reportada de un contaminante puede ser el resultado del promedio de la concentración de algunas estaciones o puede ser la concentración más alta observada en alguna estación. Este último caso debe ser el que se utilice ya que previene que altas concentraciones se disimulen con un promedio y por otra parte permite asociar fácilmente una concentración alta a un lugar específico.

- *Mostrar la variación diaria*

La estructura del índice debe permitir mostrar la variación diaria e inclusive la variación horaria de cada parámetro. Esto es posible en aquellos índices que calculan de manera separada cada parámetro. Los índices combinados no poseen esta característica.

- *Poder proyectar situación del día siguiente.*

Esta es una característica opcional ya que requiere extensiva información meteorológica.

## EJEMPLOS DE ÍNDICES EN USO

### 1. PSI

El PSI (Pollutant Standard Index), es el índice de contaminación del aire adoptado por la EPA (Environmental Protection Agency) actualmente en uso en los Estados Unidos.

El PSI involucra los cinco parámetros más importantes para los cuales se ha establecido la Norma Nacional de Calidad del Aire (NAAQS), bajo el Acuerdo del Aire Limpio (Clean Air Act). Anexo 1. Estos son material particulado en la fracción respirable PM10, bióxido de azufre, monóxido de carbono, bióxido de nitrógeno y ozono. Para cada uno de éstos, la EPA ha establecido concentraciones máximas permitidas con el propósito de evitar efectos sobre la salud que puedan ocurrir por exposición en períodos cortos.

El método de cálculo consiste en funciones lineales segmentadas, donde los puntos quiebre están definidos por las normas, y por episodios criterio que hayan sido incluidos en la reglamentación.

El modo de cálculo es máximo e individual. Se reporta el máximo valor encontrado pero si más de un parámetro se encuentra por encima de la norma, esta situación se indica explícitamente.

Utiliza cinco categorías descriptivas como son Bueno (0 – 50), Moderado (51 – 100), Insalubre (101 – 200), Muy Insalubre (201 – 300) y Peligroso (más de 300). Anexo 2.

El PSI emplea una escala entre 0 y 500. Estas categorías descriptivas se asocian con estados de Prevención (101 a 199 PSI), Alerta (201 a 300 PSI), Advertencia (301 a 400 PSI) y Emergencia (mayor a 401).

Los rangos establecidos para el PSI, corresponden a efectos potenciales sobre la salud en un día determinado para los parámetros incluidos. Cada valor ha sido establecido dentro de un margen

de seguridad basado en el actual conocimiento, con el objeto de proteger a la población más susceptible.

La EPA determina el índice sobre una base diaria para cada uno de los cinco contaminantes. Se reporta el que haya alcanzado el máximo valor.

## **2. IMECA**

El Índice Metropolitano de la Calidad del Aire, IMECA, que se utiliza, fundamentalmente, para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, acoge estructuralmente las características del índice PSI (Anexos 5, 7 y 6). Es un índice del tipo 6B2B, incluye PST, PM-10, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>. Utiliza funciones lineales segmentadas, reporta del modo máximo y utiliza términos descriptivos considerando los efectos umbrales a corto término y niveles de daño significativo.

Los valores correspondientes a un valor de 50 del índice se obtuvieron dividiendo el intervalo entre cero y la norma de calidad del aire en partes iguales. Las concentraciones para los valores de 200, 300 y 400 del índice se determinaron dividiendo el intervalo entre la norma de calidad del aire y el nivel de daño significativo (valor de 500 IMECA), en cuatro partes iguales, con la excepción de las partículas menores de 10 micrones, en cuyo caso se adoptó el PSI.

Las normas de calidad de aire, que fijan valores máximos permisibles de concentración de contaminantes, con el fin de proteger a la población, especialmente a la más susceptible, para el caso de México, ha sido establecida tomando en cuenta los criterios y normas adoptadas en otros países (SIMA, 1997, IMP, 1994, Quadri, 1992). Las normas vigentes de calidad del aire, fueron publicadas en el Diario Oficial de la Federación en diciembre de 1994 y algunos de ellos están en revisión. Anexos 3,4 y 5.

## **3. ICQA**

En cuanto al ICQA de Cataluña, cuenta con tres rangos entre 100 y -50 puntos siendo estos correspondientes a calidad buena, mejorable y pobre. Para el cálculo del ICQA, se utilizan los niveles de inmisión de PST, bióxido de azufre, bióxido de nitrógeno, ozono y monóxido de carbono. El valor del ICQA del día es el correspondiente al parámetro que haya obtenido el menor valor siendo este el que refleja mayor riesgo para la salud. El ICQA es una adaptación del PSI utilizado por la EPA. Así como en el caso del IMECA, y del PSI, el ICQA traduce a una misma escala, escala de efectos sobre la salud, las concentraciones de cada uno de los contaminantes.

Aparte de los resultados obtenidos mediante un índice de calidad es necesario complementar esta información considerando las características propias del área urbana. Es así como los factores geográficos, demográficos y socioeconómicos son la base para lograr el entendimiento del fenómeno que se presenta en cada ciudad.

También es necesario conocer el peso relativo, que en términos de calidad del aire, tienen las diferentes zonas de la ciudad, con base en las áreas donde se ubican las estaciones de monitoreo. Esto se puede definir con base en el número de días en que se supera la norma para cada contaminante, en el máximo valor alcanzado en el período de muestreo, así como en la tendencia observada en largos períodos de toma de datos, junto con la toxicidad relativa de los mismos.

## **2. EL CASO DE SANTA FE DE BOGOTÁ**

Santa Fe de Bogotá, capital de la República de Colombia, se localiza a 4° 53' latitud norte, 74° 6' longitud este. Está ubicada sobre la meseta Cundiboyacense en la cordillera Oriental de los Andes colombianos, a una altura de 2640 m sobre el nivel del mar. El clima está determinado por la altura. La temperatura promedio anual es de 14 °C (IGAC,1997). Tiene un régimen de lluvias bimodal. Las temporadas de lluvias se presentan entre los meses de abril y mayo y de octubre y noviembre. La humedad relativa media mensual es del 80% y la precipitación media anual es de 900 mm. La nubosidad media mensual es de 6/8. La velocidad media máxima del viento es de 3.0 m/s, mientras que la media mínima es de 0.2 m/s. La población para 1993, de acuerdo con el censo realizado ese año era de 5.484.244 habitantes. La población proyectada para 1997, era de 5.898.601(DAPD,1997).

Sobre el uso del suelo en la ciudad, figura 1, el área norte tiene principalmente uso residencial. En la zona central y la zona sur, el uso del suelo es mixto existiendo zonas industriales, institucionales y residenciales. Existen dos grandes zonas industriales en el centro y sur de la ciudad, la zona de Puente Aranda, hacia el centro, y el corredor industrial Bosa-Soacha hacia el sur, el cual en parte pertenece a municipios vecinos del Distrito Capital. Aparte de éstas, existen otras zonas industriales de menor tamaño en diversos puntos, es decir, la industria se encuentra diseminada por la ciudad. Desde el punto de vista espacial, Bogotá se ha desarrollado principalmente en el sentido norte - sur, con una longitud aproximada de 40 km. En los últimos años se ha venido ampliando hacia el occidente, ya que hacia el oriente debido a la presencia de los cerros, no se puede extender. En la dirección oriente - occidente tiene una longitud máxima aproximada de 25 km.

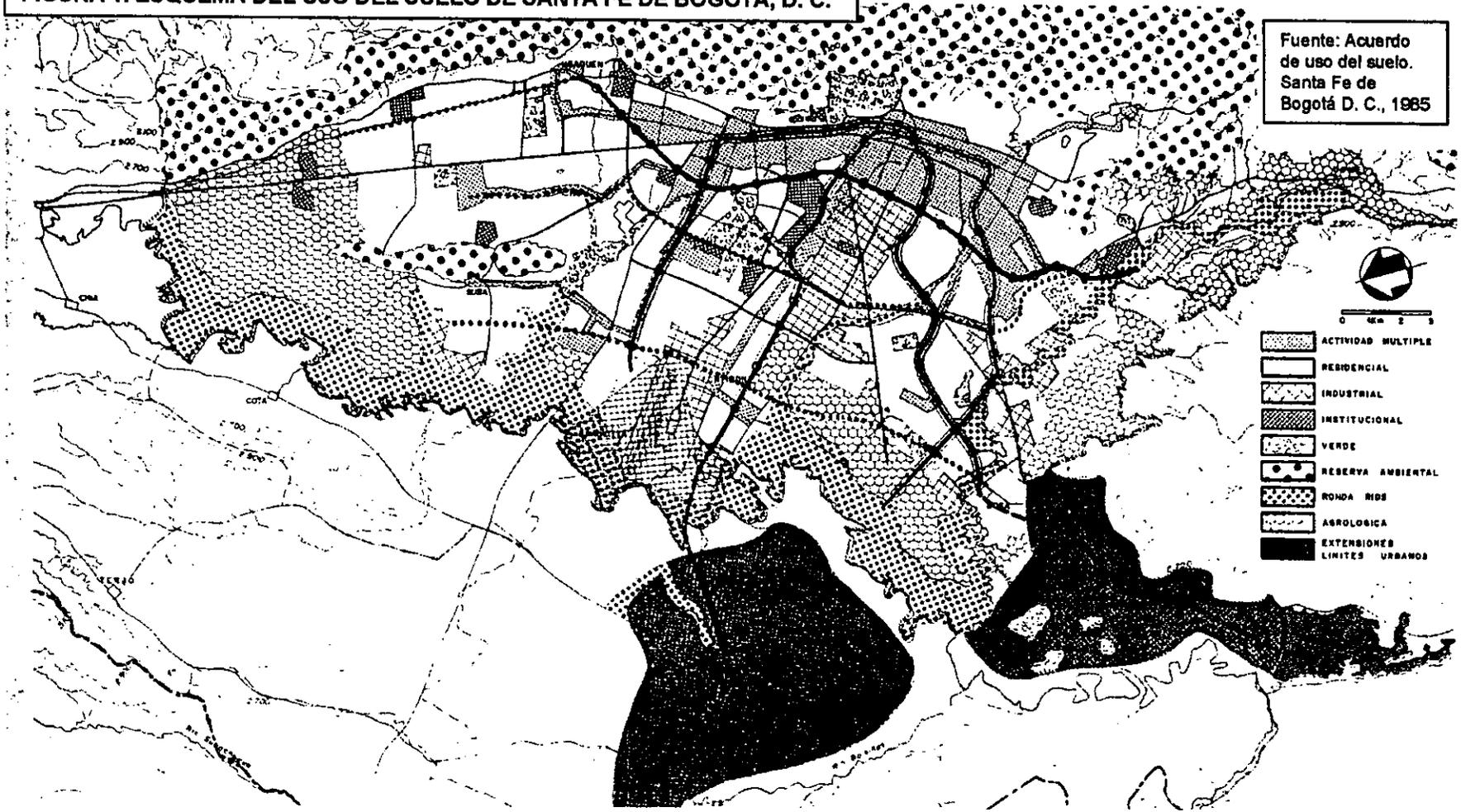
### **2.1 FUENTES MÓVILES DE CONTAMINACIÓN EN SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

#### **2.1.1 El parque automotor**

Para julio de 1996, la Secretaría de Tránsito y Transporte reportó 575 mil vehículos registrados en la ciudad, en comparación con los 345 mil reportados en abril de 1991(JICA,1996). Siguiendo con la misma tendencia de crecimiento, el número de vehículos registrados en la ciudad para 1997, era del orden de 635 mil. Sobre el porcentaje de vehículos que transita en la ciudad, pero que está registrado en otros municipios, se estima es el 33% del total de vehículos, por lo que el total de vehículos circulando por la ciudad para el segundo semestre de 1997 era de aproximadamente 950 mil.

De acuerdo con los datos de la Secretaría, los vehículos de transporte público representan un 15% del total, estando estos constituidos en un 10% por taxis y 5 % por buses, busetas y microbuses.

FIGURA 1. ESQUEMA DEL USO DEL SUELO DE SANTA FE DE BOGOTA, D. C.



Fuente: Acuerdo de uso del suelo. Santa Fe de Bogotá D. C., 1985

Los vehículos de carga representan el 4% del total, mientras que el grupo de automóviles, camionetas y camperos constituyen el 74%.

Por otra parte, el 72% de los desplazamientos de la ciudad se realizan utilizando transporte público (DANE, 1996), es decir, en buses, busetas y microbuses, mientras que el 19% corresponde a desplazamientos en vehículos particulares. El 5% corresponde a desplazamientos en taxis.

El porcentaje de vehículos por tipo varía de acuerdo con la zona de la ciudad. Es así como en las áreas sur y oeste el porcentaje de buses está entre el 20% y 30% por encima del porcentaje correspondiente a la zona norte, siendo éste superado también hasta en un 70% hacia el centro de la ciudad.

Sobre la población que cuenta con vehículo particular, corresponde a aproximadamente el 30% de los hogares. En el mismo orden de ideas, el número de desplazamientos motorizados por persona aumenta con el ingreso, mientras disminuye el número de desplazamientos a pie. En lo referente a distancias recorridas diarias, el 82.5% corresponde a los automóviles, camperos y camionetas. Los vehículos de transporte público, incluyendo los taxis recorren el 12.3% y el 5.1% camiones y otros tipos de transporte.

El crecimiento demográfico de la población en Bogotá es del 2.57% anual, mientras que el crecimiento del parque automotor es aproximadamente del 10% anual y el crecimiento de la malla vial del 1% en el mismo período.

En lo que tiene que ver con el estado de los vehículos, las revisiones y mantenimiento se realizan como medidas curativas más no preventivas (ECOPETROL, 1992). Los beneficios que traería un parque automotor con sincronización adecuada, a la altura de Santafé de Bogotá, serían disminución de emisiones de HC en aproximadamente el 52%, un 45% de las correspondientes a CO, y las de NO<sub>x</sub> en un 8%, y disminución de combustible en un 4%.

La edad promedio del parque automotor a vehículos del servicio público, el 46%, presenta edades mayores a 19 años. En lo referente a vehículos particulares, dado que en los últimos años se ha presentado un ingreso creciente de nuevos vehículos las estadísticas han variado y para el año 96, la edad promedio era de 11 a 12 años (Bocarejo, 1996).

### **2.1.2 Infraestructura vial**

La malla vial de Bogotá cuenta con 10.780 km de vías de las cuales 2.435 km. corresponde a vías principales, 1.348 km a vías colectoras y 6.997 km a vías locales. En la actualidad es alto el deterioro de la malla: el 29% presenta daños entre el 50% y el 80% del área, y se está llevando a cabo un plan de recuperación total a tres años.

En la figura 2 se presenta la malla vial principal de la ciudad y en la tabla 1 se muestra el volumen del tráfico en las principales vías de la ciudad, JICA (1996). Si bien estos datos están actualizados para 1995, el parque automotor ha crecido pero el porcentaje correspondiente a cada vía puede seguir siendo aplicable.

Según se observa en los datos presentados en la tabla 1, que corresponden a conteos realizados por JICA en 1996, en las vías principales, en un período de 12 horas y en las horas pico, entre las 7 y las 8 de la mañana, y entre las 17 y las 19 horas, las vías que soportan el mayor tráfico corresponden a vías con dirección N-S como son la autopista Norte, la avenida Quito y la avenida Séptima. Además se observó que en vías como la carrera avenida 10, autopista sur y avenida Caracas, un muy alto porcentaje de vehículos corresponde a buses, mientras que en la autopista Norte los vehículos particulares alcanzan el 75%. La dirección predominante de los desplazamientos es la dirección norte-sur. Sobre la distribución horaria del volumen, las horas de máximos corresponden en la mañana a la dirección norte-sur y en la tarde a la dirección contraria.

Tabla 1. Volumen del tráfico en las principales vías de Santa Fe de Bogotá

VIA	Volumen de tráfico en 12 horas (No de vehículos)	Volumen de tráfico entre las 7:00 y las 8:00 (No de vehículos)	Volumen de tráfico entre las 17:00 y las 19:00 (No de vehículos)	Longitud de la vía (km.)
Avenida Quito	153000-52700	13800-4100	15100-4000	*
Autopista Norte	128100-86500	9700-6400	15300-8500	*, **
Avenida 7*	116300-24200	9700-2200	7800-2700	20.5
Avenida las Américas	98100-21100	9300-1900	8600-2400	9.5
Autopista Eldorado	82600-54200	9100-4900	5000-4800	13.3
Avenida Boyacá	74600-47000	7400-4800	6900-5500	20.3
Avenida 68	68500-52000	6800-4700	6400-4800	16.5
Avenida Suba	61600-33400	4700-2800	3100-2500	11.2
Autopista del Sur	61300-35800	5600-3400	5800-2900	*
Avenida 1° de Mayo	50500-31400	4000-2600	4300-3400	12.5
Avenida Centenario	47700-31600	4800-2800	3800-3100	17.1
Autopista Medellín	47000-31400	5000-2800	4200-3000	14.5
Avenida Circunvalar	46000-32500	4100-2900	Nd	15
Avenida Caracas	45600-35800	5100-2700	4900-3900	**
Carrera Avda. 10°	41800-29200	3800-2600	3200-3000	9.52
Carrera 13	30500-24200	2200-2000	2000-1500	10.69

Nd: dato no disponible

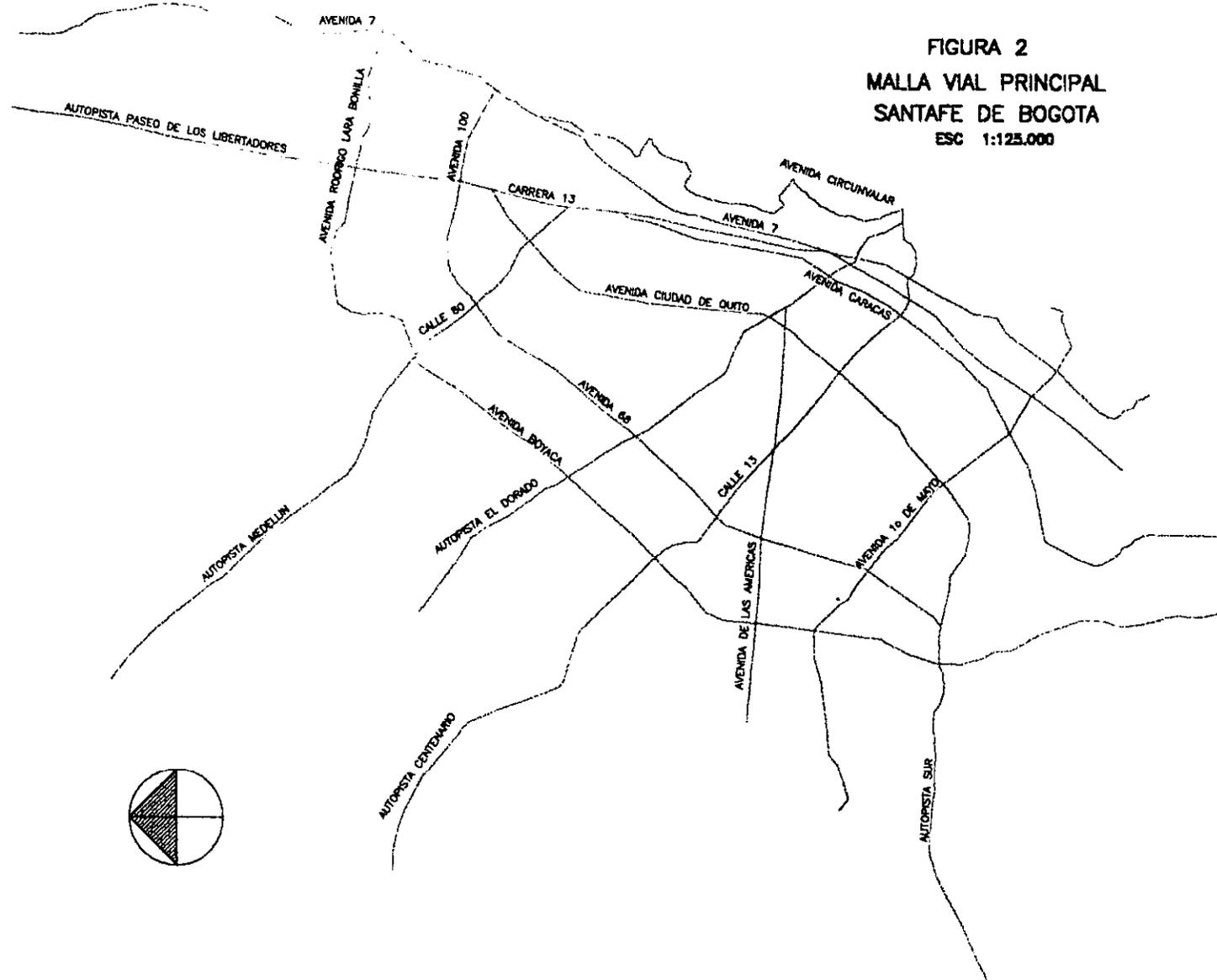
\*: Avenida Norte-Quito-Sur desde calle 147 hasta 8 sur por autopista Sur hasta calle 12 Bosa, 27.2 km

\*\* : Autopista Norte-CaraCAS-Avenida Usme desde calle 236 Avda. Usme hasta Usme, 30 km.

Fuente: JICA. The Study of the Master Urban Plan Transport of Santafé de Bogotá in Republic of Colombia, 1996

La velocidad de tránsito por las vías de la ciudad ha venido disminuyendo, siendo en horas pico menor a 10 km/h (JICA, 1996). Las causas son la insuficiencia e inadecuado mantenimiento de la malla vial de la ciudad, que en la actualidad se encuentra saturada, la alta tasa de crecimiento del parque automotor por encima de las previsiones de diseño, extensión y mantenimiento de la malla vial, y la indisciplina de los conductores. Todo esto resulta en mayores niveles de contaminación debido a que los vehículos trabajan en condiciones adversas, con gran ineficiencia en el aprovechamiento del combustible, aumentando los tiempos de desplazamiento.

FIGURA 2  
MALLA VIAL PRINCIPAL  
SANTAFE DE BOGOTA  
ESC 1:125.000



### **2.1.3 Combustibles**

El parque automotor de la ciudad utiliza principalmente gasolina y de manera secundaria aceite combustible para motores, ACPM. El uso de gas licuado de petróleo, y gas natural comprimido es muy limitado en el sector transporte.

En Colombia se ha desarrollado, desde la década de los ochenta, un programa de mejoramiento de calidad de la gasolina con el objeto de buscar mayor rendimiento, hacer más eficiente el consumo y reducir la contaminación (Promigas, 1996).

Los resultados más importantes que se han obtenido han sido la eliminación del tetraetilo de plomo de la gasolina producida en el país, y la prohibición de la importación de gasolina con plomo. Otro logro ha sido la modificación del octano de las gasolinas producidas en el país de acuerdo a las zonas de consumo determinadas por la altura sobre el nivel del mar. Por último se ha logrado una disminución del Reid Vapor Pressure, con lo que ha disminuido el contenido de vapores livianos en la gasolina, principalmente butanos, que se evaporan, durante el transporte y son fotorreactivos.

Desde 1993 se inició la adición de detergentes dispersantes a la gasolina con el objeto de prevenir la formación de depósitos en los carburadores en los sistemas de combustión, logrando un mejoramiento en el funcionamiento de los motores que a la postre redundó en una disminución de los niveles de emisión de los contaminantes.

La gasolina utilizada en Colombia no es oxigenada. Con la utilización de oxigenados se lograría mejorar la combustión y reducción de las emisiones ya que la mezcla aire-combustible a alturas como la de la ciudad, donde la densidad del aire es menor, genera altas emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono (ECOPETROL, 1996); sin embargo, se requiere de mayor estudio y experimentación antes de la implantación a nivel comercial de las gasolinas reformuladas (Rin 1996).

Como se mencionó anteriormente, el uso del gas licuado de petróleo y del gas natural comprimido están muy limitados e implantar su utilización requeriría de la reconversión de los motores de los vehículos así como la distribución masiva de los mismos.

#### **2.1.3.1 Reglamentación**

Los límites que ha fijado el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente de la ciudad a la emisión permisible para fuentes móviles con motor a gasolina y con motor diesel se presentan en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Normas de emisión permisible para fuentes móviles con motor a gasolina para Santa Fe de Bogotá

Modelo año	CO (% vol)	HC (ppm)
Anterior a 1974	7	1000
1975 a 1980	5.5	800
1981 a 1990	5	650
1991 a 1995	4	500
1996 a 1997	3.5	450
1998 a 2000	2.5	300
Posterior a 2001	1	200

Fuente: DAMA, Resolución 160/96

Tabla 3. Normas de emisión permisible para fuentes móviles con motor diesel para Santa Fe de Bogotá

Modelo año	Vehículo liviano opacidad (%)	Vehículo mediano opacidad (%)	Vehículo pesado opacidad (%)
Anterior a 1980	65	65	65
1981 a 1985	60	60	60
1986 a 1990	55	55	55
1991 a 1995	50	50	50
1996 a 2000	50	50	50
Posterior a 2001	40	40	40

Fuente: DAMA, Resolución 160/96

Donde:

- Opacidad es el grado de reducción que ocasiona el gas al paso por él de la luz visible.
- Vehículo liviano es aquel diseñado para transportar hasta 12 pasajeros o una carga cuyo peso bruto vehicular es menor o igual a 2.800 kg.
- Vehículo mediano es aquel diseñado para transportar más de 12 pasajeros o una carga, cuyo peso bruto vehicular sea superior a 2.800 kg y menor o igual a 3.860 kg.
- Vehículo pesado es aquel diseñado para transportar más de 19 pasajeros o una carga cuyo peso bruto vehicular sea mayor a 3.860 kg.

Peso bruto vehicular es el peso vehicular más la capacidad de pasajeros y/o su carga útil.

## **2.2 FUENTES FIJAS DE CONTAMINACIÓN EN SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

### **2.2.1 Ubicación**

Existen dos grandes zonas industriales en la ciudad. La primera se ubica en el área centro-occidental en la zona de Puente Aranda, donde se localizan principalmente industrias metalmecánicas, manufactureras, químicas, productos alimenticios, agregados para construcción y producción de concreto (Sánchez, 1994, Alcaldía, 1997). La segunda se localiza en el corredor Bosa - Soacha, al sur de la ciudad. En esta área se encuentran industrias químicas, metalmecánicas, farmacéuticas, ladrilleras y almacenamiento de gas natural. Existen además, otros sectores como la zona de Usme en la que se encuentran industrias ladrilleras, plantas de asfalto, extracción de agregados para la construcción y el relleno sanitario de Doña Juana, donde se disponen todos los residuos sólidos de la ciudad. Otras zonas industriales menores se encuentran en la Avenida El Dorado, la cuenca de La Conejera en Suba, en Fontibón, en la cuenca del Tintal y en el río Tunjuelo, además de otras zonas tales como La Floresta, Autopista Norte entre calle 134 y calle 140 y Avenida 68 entre calles 20 y 13.

De acuerdo con lo anterior se observa que no se puede considerar una ubicación específica para la industria ya que fuera de los dos principales centros industriales, ésta se encuentra diseminada por la ciudad.

### **2.2.2. El sector industrial y su aporte a la contaminación del aire**

La participación de la industria de Bogotá frente a la industria del país es del 32% para la gran industria y del 37% para el total de la industria. En la Encuesta Manufacturera que se realizó en 1989 se determinó que el número de establecimientos industriales era de 2.372 de los cuales se consideró que 1.300 eran fuentes potenciales de contaminación por emisiones a la atmósfera; sin embargo, para el mismo año la Secretaría de Salud de Santa Fe de Bogotá, entidad que para entonces tenía bajo su responsabilidad el control de la contaminación industrial tenía en sus archivos solamente 980 establecimientos inscritos, por lo que la cobertura de control era del 75.4 %.

Sobre la participación de las emisiones industriales a la atmósfera, según el Departamento Nacional de Planeación- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (Sánchez, 1994), el mayor parámetro de contaminación atmosférica industrial, en peso, es el material particulado ubicando como los procesos productivos que más contribuyen a ello las ladrilleras, industrias de hierro y acero, carbonato de sodio, mezclas de concreto y mezclas asfálticas. Por otra parte, en un estudio realizado por JICA (1991) aparece el SO<sub>x</sub> como el contaminante con mayor aporte por fuentes fijas.

Teniendo en cuenta que para la obtención de los resultados, tanto la clasificación industrial empleada como el área de cobertura difieren, se concluye que existe gran incertidumbre sobre la contribución de cada uno de los contaminantes generados por fuentes fijas.

Para el sector industrial el combustible líquido que más se emplea es el crudo de castilla que se utiliza mayoritariamente en calderas (JICA, 1991), seguido por el ACPM. Sobre combustibles sólidos, el de mayor utilización es el carbón que se emplea principalmente en hornos de ladrillo. En un pequeño porcentaje se utiliza leña. Como combustible gaseoso se utiliza gas propano. La altura predominante de las chimeneas está entre los 11 y 20 m. Más de 31 m sólo presenta el 3% de las mismas.

### **3. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD PARA LA FORMULACIÓN DE UNA PROPUESTA DE INDICE DE CALIDAD DEL AIRE**

#### **3.1 LA RED DE MONITOREO**

A partir de octubre de 1997 se encuentra operando en la ciudad una red automática de monitoreo para la meteorología superficial y la calidad del aire. Esta red está compuesta por doce estaciones, dos de las cuales son únicamente meteorológicas. Las demás estaciones miden parámetros de calidad de aire y solamente algunos parámetros meteorológicas. En la figura 3 se observa la ubicación de las mismas.

Las estaciones meteorológicas se localizan en los extremos norte, Escuela Colombiana de Ingeniería, ECI, y sur de la ciudad, Central de Mezclas. En estas se toman registros de presión, precipitación, humedad relativa, radiación, dirección y velocidad del viento, y temperatura a diferentes alturas: 2m, 8m y 20m sobre el nivel del piso.

En las demás estaciones se toman registros de precipitación, dirección y velocidad del viento, además de los parámetros de calidad indicados en la tabla 4. Los parámetros incluidos en las mediciones son CO, SO<sub>2</sub>, PM-10, NO<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> e hidrocarburos no metánicos. De estas estaciones, dos están localizadas en el norte de la ciudad: la estación Universidad El Bosque al nororiente y la estación Universidad Juan N. Corpas al noroccidente. La estación Engativá se ubica al occidente de la ciudad. En el área central han sido establecidas las estaciones Universidad de Santo Tomás, estación Radio Cadena Nacional, RCN, estación Universidad Nacional de Colombia y estación Centro de Atención Distrital Especializado, CADE. Finalmente, a la zona sur corresponden las estaciones Hospital San Juan de Dios, estación Sony Music y estación Cazucá.

Con relación al uso del suelo de las áreas en las que se ubican las estaciones, tres de ellas se localizan en zonas industriales, la estación CADE, en la zona industrial de Puente Aranda, la estación Sony Music en el área industrial de Bosa y la estación Cazucá en el corredor industrial Bosa – Soacha.

Las estaciones RCN, Santo Tomás, San Juan de Dios y Universidad Nacional se localizan en zonas de uso múltiple, es decir, comercial, residencial e institucional, atravesadas por corredores viales de alto tráfico.

La estación El Bosque se localiza en área residencial en el norte de la ciudad. La estación Engativá, al occidente de la ciudad, se ubica en una zona que se han venido desarrollando en los últimos años con vocación residencial.

FIGURA 3  
LOCALIZACION DE ESTACIONES  
DE MONITOREO EN  
SANTAFE DE BOGOTA  
ESC 1:125.000

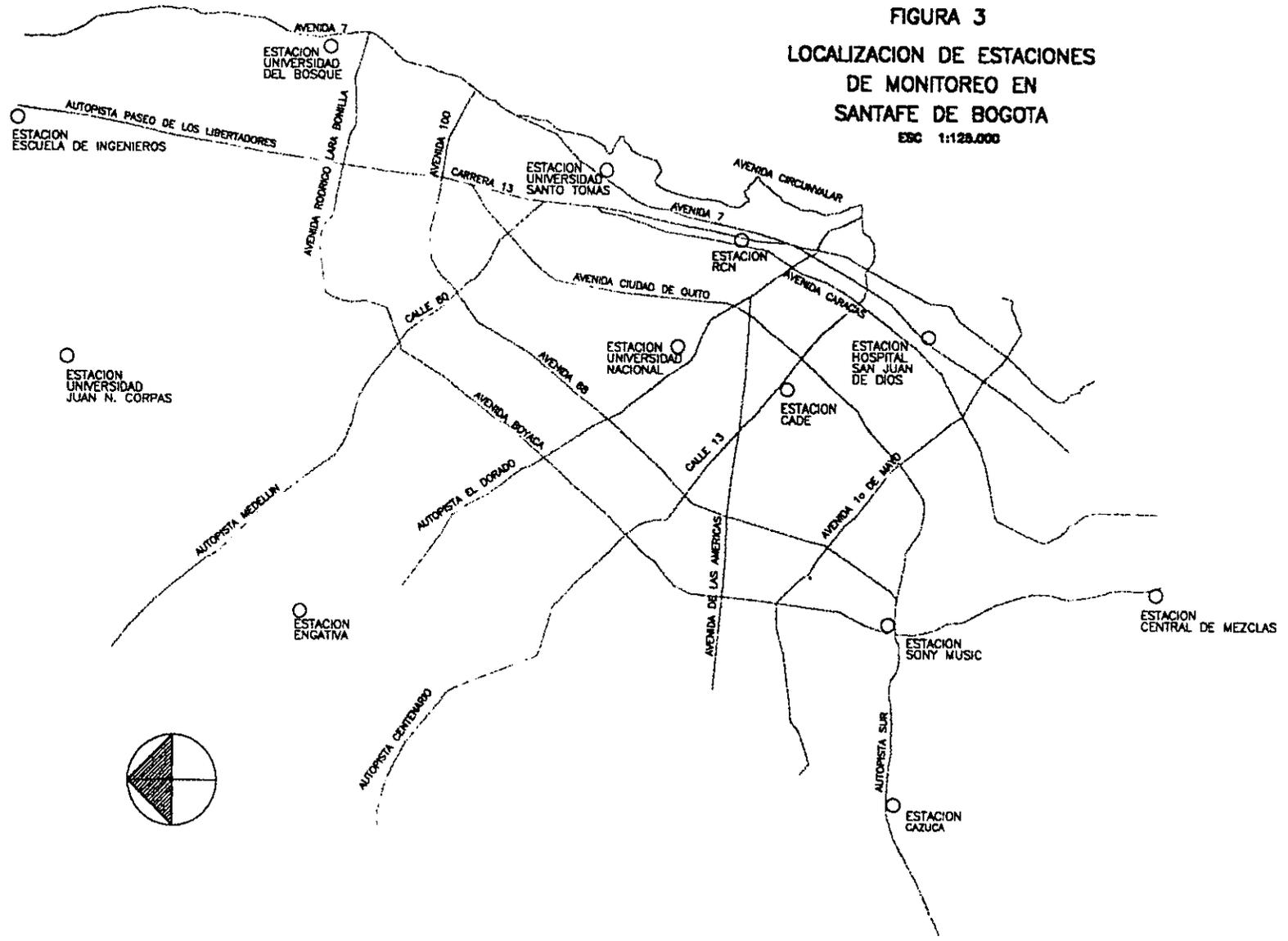


Tabla 4. Parámetros medidos en las estaciones de la red de monitoreo del DAMA para octubre, noviembre y diciembre de 1997

Parámetro	Estación											
	Boque	RCN	Sony	S. Juan Dios	Univ. Nacional	Engativá	Cazucá	Sto Tomás	Corpaa	CADE	Escuela de Ingeniería	Central de Mezclas
SO <sub>2</sub>	X, XI, XII											
NO <sub>2</sub>	X, XI, XII		X, XI, XII		X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI	X, XI, XII		
NO <sub>x</sub>	X, XI, XII		X, XI, XII		X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII		
NO	X, XI, XII		X, XI, XII		X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII		
CO		XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII		
O <sub>3</sub>			X, XI, XII				X, XI		X, XI, XII			
CH <sub>4</sub>		X, XI, XII	X, XI, XII		X, XI, XII		X, XI, XII					
NMHC		X, XI, XII	X, XI, XII									
PM-10	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII		X, XI, XII						
Velocidad del viento	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII
Dirección del viento	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII		X, XI, XII
Radiación											X, XI, XII	X, XI, XII
Precipitación	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII	X, XI, XII
Presión											X, XI, XII	X, XI, XII
Temperatura											X, XI, XII	X, XI, XII
Humedad relativa											X, XI, XII	X, XI, XII

X: octubre  
 XI: noviembre  
 XII: diciembre

La estación Corpas se localiza en el límite del área urbana en el noroccidente de Bogotá, en una zona de acelerado crecimiento.

Para este trabajo se utilizaron los registros horarios tomados durante los meses de octubre, noviembre y diciembre de 1997, de todos los parámetros evaluados en cada una de las estaciones. Esta es la única información de la red facilitada por el D.A.M.A. para ser utilizada exclusivamente en el desarrollo de este trabajo.

Tabla 5. Unidades utilizadas en los registros de la red del D.A.M.A.

Parámetro	Unidad
Presión	mm Hg
Radiación	W/m <sup>2</sup>
Precipitación	Mm
Temperatura	°C
Humedad relativa	%
Dirección del viento	°
Velocidad del viento	m/s
SO <sub>2</sub>	ppb
NO <sub>x</sub>	ppb
NO	ppb
NO	ppb
PM-10	µg/m <sup>3</sup>
CH <sub>4</sub>	ppm
NMHC	ppm
O <sub>3</sub>	ppb
CO	ppm

### 3.2 NORMATIVIDAD VIGENTE

La normatividad nacional vigente para la calidad del aire está contenida en el Decreto No. 2 de 1982 donde se establecieron las concentraciones máximas permisibles de los diferentes parámetros en condiciones estándar, 760 mm Hg y 25°C, tal como se muestra en la tabla 6. Para las condiciones de la ciudad, presión 560 mm Hg y temperatura media de 14°C, se calcularon los valores correspondientes de la norma, como se observa en la misma tabla.

Tabla 6. Normatividad colombiana, Decreto No. 2 de 1982

Parámetro	Características	Norma Nacional	Norma para Santa Fe de Bogotá
Partículas suspendidas totales	Promedio geométrico anual	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	76.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Promedio de 24 horas	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	307.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
SO <sub>2</sub>	Promedio anual	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	76.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Promedio de 24 horas	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	307.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Promedio de 3 horas	1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1152 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
CO	Promedio de 8 horas	15 $\text{mg}/\text{m}^3$	11.5 $\text{mg}/\text{m}^3$
	Promedio de 1 hora	50 $\text{mg}/\text{m}^3$	38.4 $\text{mg}/\text{m}^3$
O <sub>3</sub>	Promedio de 1 hora	170 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	130.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NO <sub>x</sub>	Promedio anual	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	76.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Para efecto de evaluar la calidad del aire se utilizaron de la normatividad colombiana, como valores de referencia los correspondientes a SO<sub>2</sub>, promedio de 24 horas y promedio de 3 horas, CO, promedio de 8 horas y promedio de 1 hora y O<sub>3</sub>, promedio de una hora.

Por no existir norma para PM-10 y por ser inaplicable la norma anual de NO<sub>2</sub> para tres meses de datos, se adoptaron como valores límite de referencia normas de otros países. Para PM-10 se utilizó la norma de Estados Unidos de Norteamérica establecida por la EPA, promedio de 24 horas. Para NO<sub>2</sub> se utilizó la norma mexicana, promedio de 1 hora.

Tanto la norma colombiana (Decreto No 2/82), como la norma estadounidense (EPA,1997) y la norma mexicana (IMP,1994) han sido establecidas teniendo como consideración básica la protección de la salud de la población por lo que quedan justificadas como valores límite de referencia.

Tabla 7. Valores límite de referencia

Parámetro	Características	Valor de referencia
PM-10	Promedio de 24 horas	115 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
SO <sub>2</sub>	Promedio de 24 horas	152.8 ppb
	Promedio de 3 horas	573.1 ppb
CO	Promedio de 8 horas	13.1 ppm
	Promedio de 1 hora	43.7 ppm
O <sub>3</sub>	Promedio de 1 hora	86.6 ppb
NO <sub>2</sub>	Promedio de 1 hora	210 ppb

### 3.3 METEOROLOGÍA

- *Condiciones meteorológicas en octubre, noviembre y diciembre/97, frente a condiciones promedio*

Las series largas de información de meteorología superficial con que cuenta Colombia, corresponden a estaciones de la red hidrometeorológica nacional, operada por el Instituto de Estudios Ambientales IDEAM. En la ciudad de Santafé de Bogotá, la red nacional tiene dos estaciones, distintas de la red del DAMA, con información completa desde que iniciaron su operación.

Para comparar la situación meteorológica de los meses de octubre, noviembre, y diciembre de 1997 con los valores promedio para estos mismos meses, se escogió la estación hidrometeorológica del aeropuerto Eldorado, perteneciente a la red del IDEAM. Esta estación tiene registros completos desde 1972.

De acuerdo con los datos tomados en el aeropuerto, la temperatura media anual es de 13.4 °C, la humedad relativa media mensual es del 80%, la precipitación media anual es de 779.9 mm. Sobre la nubosidad, se ha reportado como promedio mensual un valor de seis octavos. La velocidad de viento máxima mensual tiene un promedio de 3.0 m/s, mientras que la velocidad mínima mensual tiene un promedio de 0.2 m/s. La tabla 8 presenta los datos meteorológicos de la estación aeropuerto EL Dorado.

En la tabla 9 y con el propósito de comparar las condiciones en 1997 frente a la serie, se presentan los datos en orden ascendente. Se observan para octubre y noviembre precipitaciones bajas dentro de la serie y para diciembre la menor de la serie. De temperatura media se presentan los valores más altos de la serie para octubre y diciembre, siendo también alto en noviembre. La humedad relativa es la más baja para octubre y diciembre siendo baja también para noviembre. De  $p+2X$  se observa que las condiciones de calidad de aire para ese período están enmarcadas, en lo que a condiciones meteorológicas se refiere, con una situación de menor precipitación, menor humedad relativa, mayor temperatura y mayor brillo solar, que las condiciones medias determinadas por las series de datos para los meses de octubre, noviembre y diciembre.

Tabla 8. Datos meteorológicos, estación aeropuerto El Dorado

Año	Precipitación (mm)			Temperatura (°C)			Humedad Relativa (%)		
	Octubre	Noviembre	Diciembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1972	71.6	101.1	28.5	13	13.4	13	81	82	80
1973	115.4	105.8	117.3	12.8	13.1	12.4	84	84	83
1974	100.3	150.6	24 77.9	12.5	13.2	12	83	85	80
1975	160.8	70.7		12.4	12.9	12.3	85	87	87
1976	140	81.6	49.5	13.3	13	12.9	84	79	80
1977	120.4	82.3	26.9	13.6	13.2	13.3	84	86	79
1978	102.9	47.4	30.2	13.2	13.2	13.2	80	82	80
1979	133.4	141.7	25.4	13.7	14	13.3	82	84	81
1980	62.1	50.7	102.2	13.7	13.1	12.9	78	81	84
1981	113.4	111.8	25.5	13.2	13.7	13.4	85	85	82
1982	112.7	63.6	44.6	13.3	13.4	13.8	84	84	83
1983	77	43	132.6	13.3	13.6	12.8	83	82	83
1984	50.4	86.3	40.2	13.1	13	12.9	85	85	81
1985	79.8	73.8	34.7	13.1	12.7	12.5	84	85	80
1986	217.5	122.3	4	13.4	13.5	13	87	86	81
1987	148.7	64.2	29.2	13.9	13.8	13.4	85	83	77
1988	117.9	151	78.8	13.2	13.3	12.7	83	86	83
1989	82.1	30.7	66.2	13.6	13.8	12.6	80	81	79
1990	195.5	85	97.4	13.4	13.8	13.5	84	78	80
1991	47.1	103.9	64.1	13.4	13.6	14.1	79	85	82
1992	25.4	108.3	59	14	13.8	13.9	75	80	77
1993	67.5	146.9	25.5	13.7	13.8	13.9	82	85	79
1994	93.9	189.1	9.3	13.2	13.2	13.3	82	84	79
1995	112	97.3	78.4	13.4	13.1	12.5	79	82	81
1996	90.6	12.6	34.7	13.2	13.5	12.9	84	81	81
1997	63	38.1	2.7	14.5	13.8	14.1	74	81	75
1998				14.2	14.4	13.9	80	78	79
1999				13.3	13.6	13.4	83	84	81

Fuente: IDEAM

- Velocidad del viento

Para analizar el comportamiento de la velocidad del viento durante los tres meses, se calculó la velocidad promedio para cada hora del día en cada una de las doce estaciones de la red del DAMA. La velocidad del viento a lo largo del día para cada estación se presenta en la figura 4. Las velocidades mínimas, que ocurren en general en horas de la madrugada, son muy bajas, ubicándose en las categorías de ventolina y viento flojito, de acuerdo con la escala de Beaufort.

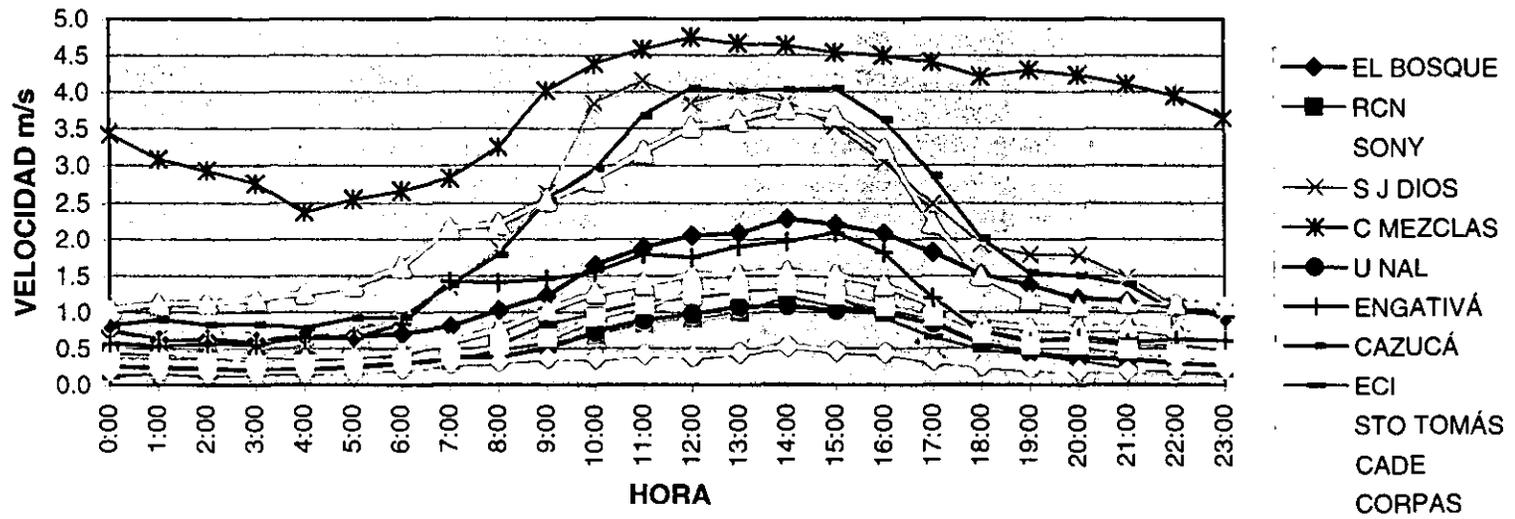
Tabla 9. Series ordenadas de datos meteorológicos, estación aeropuerto El Dorado. 1972-1999

Precipitación (mm)			Temperatura (°C)			Humedad Relativa (%)		
Octubre	Noviembre	Diciembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
25.4	12.6	2.7	12.4	12.7	12	74	78	75
47.1	30.7	4	12.5	12.9	12.3	75	78	77
50.4	38.1	9.3	12.8	13	12.4	78	79	77
62.1	43	24	13	13	12.5	79	80	79
63	47.4	25.4	13.1	13.1	12.5	79	81	79
67.5	50.7	25.5	13.1	13.1	12.6	80	81	79
71.6	63.6	25.5	13.2	13.1	12.7	80	81	79
77	64.2	26.9	13.2	13.2	12.8	80	81	79
79.8	70.7	28.5	13.2	13.2	12.9	81	82	80
82.1	73.8	29.2	13.2	13.2	12.9	82	82	80
90.6	81.6	30.2	13.2	13.2	12.9	82	82	80
93.9	82.3	34.7	13.3	13.3	12.9	82	82	80
100.3	85	34.7	13.3	13.4	13	83	83	80
102.9	86.3	40.2	13.3	13.4	13	83	84	80
112	97.3	44.6	13.3	13.5	13.2	83	84	81
112.7	101.1	49.5	13.4	13.5	13.3	83	84	81
113.4	103.9	59	13.4	13.6	13.3	84	84	81
115.4	105.8	64.1	13.4	13.6	13.3	84	84	81
117.9	108.3	66.2	13.4	13.6	13.4	84	85	81
120.4	111.8	77.9	13.6	13.7	13.4	84	85	81
133.4	122.3	78.4	13.6	13.8	13.4	84	85	82
140	141.7	78.8	13.7	13.8	13.5	84	85	82
148.7	146.9	97.4	13.7	13.8	13.8	84	85	83
160.8	150.6	102.2	13.7	13.8	13.9	85	85	83
195.5	151	117.3	13.9	13.8	13.9	85	86	83
217.5	189.1	132.6	14	13.8	13.9	85	86	83
			14.2	14	14.1	85	86	84
			14.5	14.4	14.1	87	87	87

Dato correspondiente a 1997

Fuente: IDEAM

**VELOCIDAD DEL VIENTO**  
**FIGURA 4**



En general se observa aumento de la velocidad entre las 6 y las 7 horas para la mayoría de las estaciones. En algunas de las estaciones periféricas el ascenso en la velocidad del viento es más temprano: a las 3 horas en la estación Corpas y a las 5 en las estaciones Escuela de Ingeniería y Central de Mezclas. Caso contrario en la estación RCN, donde se observa aumento desde las 8. Figura 4.

Las velocidades aumentan durante el día alcanzando los valores máximos que se clasifican dentro de las categorías de viento flojito y ventolina. Las velocidades máximas se observan en las estaciones del sur de la ciudad: Central de Mezclas, San Juan de Dios y Cazucá.

En la tabla 10 se presentan, del valor promedio para cada hora del día, el valor máximo y el valor mínimo. Como se observa, la máxima velocidad se presenta en la estación Central de Mezclas alcanzando un valor máximo de 4.7 m/s entre las 13 y las 14 horas, mientras que la estación Santo Tomás presenta el valor mínimo entre las velocidades máximas, alcanzando sólo 0.4 m/s entre las 14 y las 15 horas.

Tabla 10. Velocidades promedio horario máximo y mínimo en cada estación.

Estación	Velocidad máxima	Grado Beaufort	Velocidad Mínima	Grado Beaufort
El Bosque	2.3	2	0.6	2
RCN	1.2	2	0.3	2
Sony	1.6	2	0.4	2
S.J. Dios	4.1	3	0.6	2
Universidad Nacional	1.1	2	0.2	1
Engativá	2.1	2	0.5	2
Cazucá	4	3	0.8	2
Escuela Ingeniería	1.3	2	0.1	1
Central de Mezclas	4.7		2.4	2
Santo Tomás	0.4		0.2	1
Corpas	3.8	3	1	2
Cade	1.4	2	0.3	2

- Frecuencia de distribución de dirección y velocidad del viento

Con base en los datos horarios para cada estación durante los tres meses en estudio, se representó la distribución de frecuencias de dirección y velocidad del viento como una rosa de vientos (gráficas 5 a 16). Estas gráficas no se pueden considerar como verdaderas rosas de viento, por cuanto para ser la representación de los patrones característicos del movimiento del aire, de manera local, deben ser resultado del promedio de varios años (Wark, 1997).

Las velocidades menores a 1 m/s se consideraron calma, condición que en algunas estaciones se presenta en un alto porcentaje del tiempo. De las estaciones localizadas al norte de la ciudad, en la estación de la Escuela Colombiana de Ingeniería el porcentaje de calma es del 79% y las velocidades superiores a 1 m/s están en su mayor porcentaje entre 1 y 2 m/s con una dirección prevaeciente del sureste. En la estación El Bosque el porcentaje de calma es del 48%, y en las horas de velocidades mayores, la dirección que se presenta con mayor frecuencia es del suroccidente. En la estación Corpas, el porcentaje de tiempo en calma es del 27% y presenta amplia gama de velocidades inclusive por encima de los 6 m/s con alta frecuencia de vientos del norte, noreste e inclusive del este.

Al occidente, en la estación Engativá, el porcentaje de calma es del 54% y como en el caso de las estaciones anteriores, la velocidad del viento más frecuente está entre 1 y 2 m/s. Para esta estación las direcciones más frecuentes son el norte y el noreste.

Las estaciones de la zona central de la ciudad presentan altos porcentajes de calma, especialmente en la estación Santo Tomás con un porcentaje del 97%, seguida por las estaciones RCN y Universidad Nacional con 82 y 81% respectivamente de tiempo con viento en calma. Por último la calma en la estación CADE se presenta en un 74%. En estas estaciones la velocidad más frecuente está entre 1 y 2 m/s y las direcciones que más frecuentes son del este y sureste.

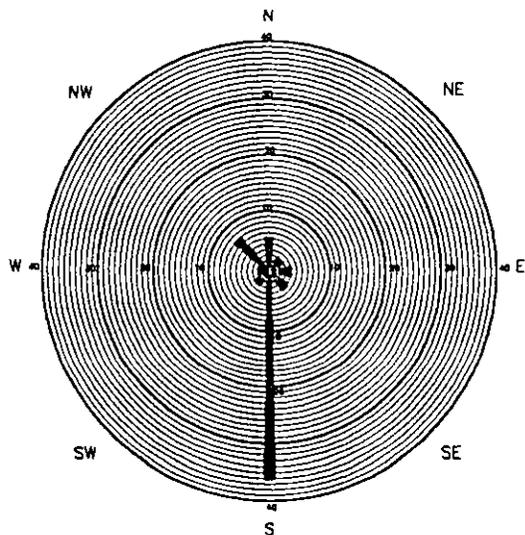
Dentro de la zona sur de la ciudad, en la estación Sony el porcentaje de calma es del 61%, la velocidad está mayoritariamente dentro del rango de 1 y 2 m/s con direcciones del sureste y del sur. La estación San Juan de Dios registra un 41% de calma, la velocidad, como en el caso anterior, entre 1 y 2 m/s y dirección del viento del sur. En la estación Cazucá el porcentaje de calma es sensiblemente menor, 25%, con direcciones principalmente del occidente y del sureste.

El menor porcentaje de calma se presenta en la estación Central de Mezclas en el extremo sur de la ciudad, con un 14%. Las velocidades entre 4 y 5 y entre 5 y 6 m/s son las más frecuentes y las direcciones del sur y sureste las de mayor ocurrencia.

#### - Dirección del viento

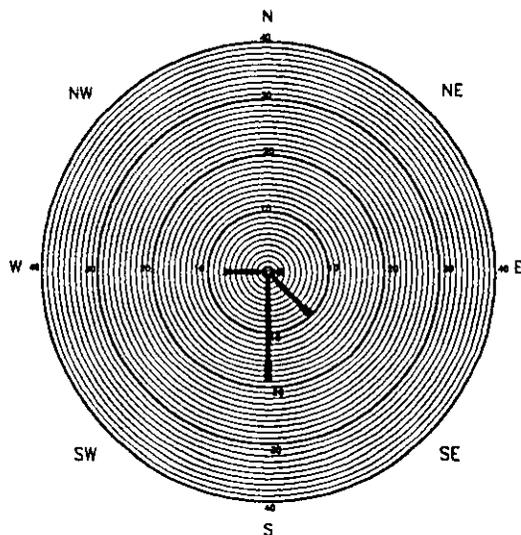
Para conocer cómo cambia la dirección del viento a lo largo del día se realizó un análisis horario de frecuencias, en cada una de las estaciones. Con base en esta información se elaboró la tabla 11, en la que se muestra en resumen, para horas impares desde la 1 hasta las 19 horas, la dirección prevaeciente del viento. En los casos en los que no se indica una dirección significa que ésta era variable.

**FIGURA 5**  
ROSA DE LOS VIENTOS  
ESTACION HOSPITAL SAN JUAN DE DIOS



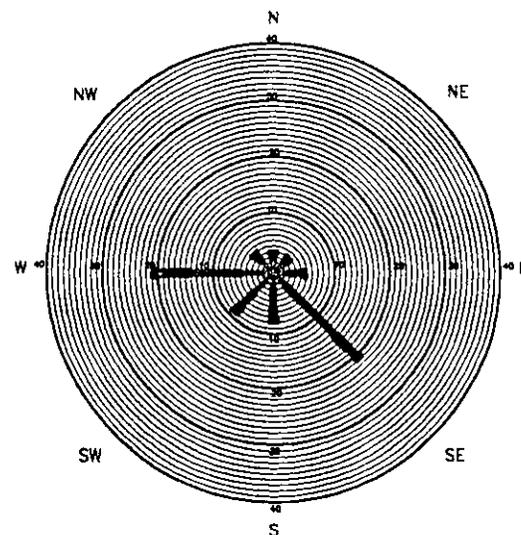
PORCENTAJE DE VIENTO EN CALMA (V<1m/s): 41%	
VIENTOS CON V>1m/s: Resumen de direcciones	
N:	5%
NE:	2%
E:	3%
SE:	3%
S:	36%
SW:	2%
W:	1%
NW:	7%

**FIGURA 6**  
ROSA DE LOS VIENTOS  
ESTACION SONY MUSIC



PORCENTAJE DE VIENTO EN CALMA (V<1m/s): 62%	
VIENTOS CON V>1m/s: Resumen de direcciones	
N:	0%
NE:	0%
E:	2%
SE:	10%
S:	19%
SW:	0%
W:	7%
NW:	0%

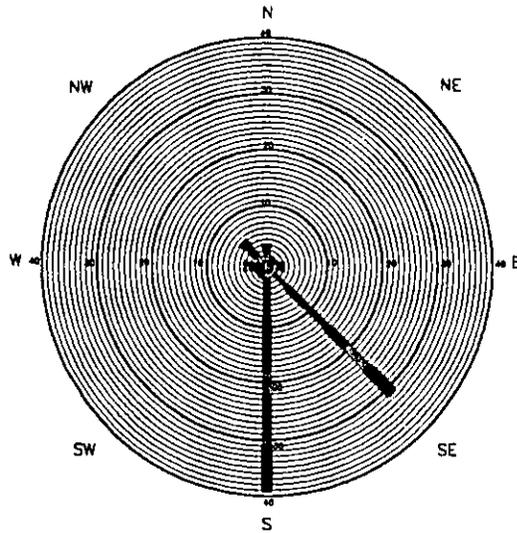
**FIGURA 7**  
ROSA DE LOS VIENTOS  
ESTACION CAZUCA



PORCENTAJE DE VIENTO EN CALMA (V<1m/s): 25%	
VIENTOS CON V>1m/s: Resumen de direcciones	
N:	3%
NE:	3%
E:	5%
SE:	21%
S:	8%
SW:	9%
W:	21%
NW:	4%

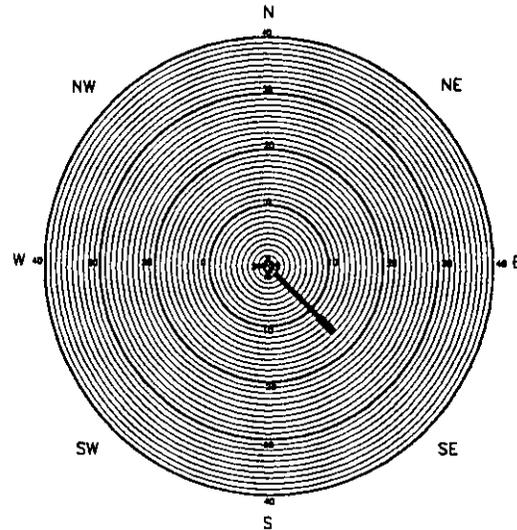
CONVENCIONES	
1 a 2 m/s	▬
2 a 3 m/s	▬▬
3 a 4 m/s	▬▬▬
4 a 5 m/s	▬▬▬▬
5 a 6 m/s	▬▬▬▬▬
Mas de 6 m/s	▬▬▬▬▬▬

**FIGURA 8**  
ROSA DE LOS VIENTOS  
ESTACION CENTRAL DE MEZCLAS



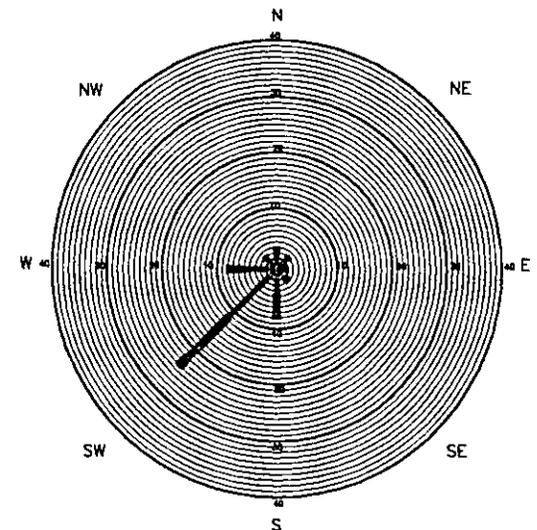
PORCENTAJE DE VIENTO EN CALMA ( $V < 1 \text{ m/s}$ ): 15%	
VIENTOS CON $V > 1 \text{ m/s}$ : Resumen de direcciones	
N:	3%
NE:	1%
E:	2%
SE:	31%
S:	39%
SW:	1%
W:	3%
NW:	5%

**FIGURA 9**  
ROSA DE LOS VIENTOS  
ESTACION ESCUELA DE INGENIERIA



PORCENTAJE DE VIENTO EN CALMA ( $V < 1 \text{ m/s}$ ): 79%	
VIENTOS CON $V > 1 \text{ m/s}$ : Resumen de direcciones	
N:	1%
NE:	0%
E:	1%
SE:	16%
S:	1%
SW:	0%
W:	2%
NW:	0%

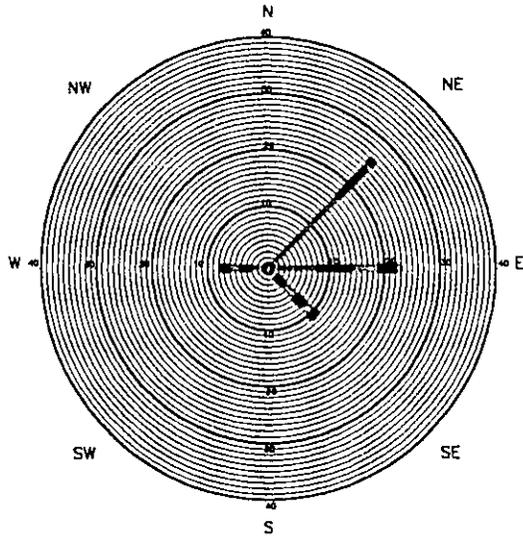
**FIGURA 10**  
ROSA DE LOS VIENTOS  
ESTACION UNIVERSIDAD DEL BOSQUE



PORCENTAJE DE VIENTO EN CALMA ( $V < 1 \text{ m/s}$ ): 49%	
VIENTOS CON $V > 1 \text{ m/s}$ : Resumen de direcciones	
N:	3%
NE:	2%
E:	1%
SE:	2%
S:	8%
SW:	25%
W:	8%
NW:	2%

CONVENCIONES	
1 a 2 m/s	▬
2 a 3 m/s	▬▬
3 a 4 m/s	▬▬▬
4 a 5 m/s	▬▬▬▬
5 a 6 m/s	▬▬▬▬▬
Mas de 6 m/s	▬▬▬▬▬▬

**FIGURA 11**  
ROSA DE LOS VIENTOS  
ESTACION UNIVERSIDAD JUAN N. CORPAS

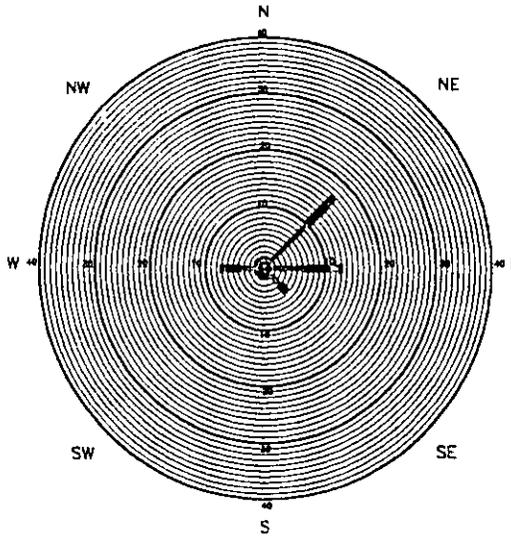


PORCENTAJE DE VIENTO EN CALMA  
( $V < 1\text{m/s}$ ): 27%

VIENTOS CON  $V > 1\text{m/s}$ :  
Resumen de direcciones

N:0%  
NE:26%  
E:23%  
SE:11%  
S:0%  
SW:1%  
W:8%  
NW:0%

**FIGURA 12**  
ROSA DE LOS VIENTOS  
ESTACION ENGATIVA

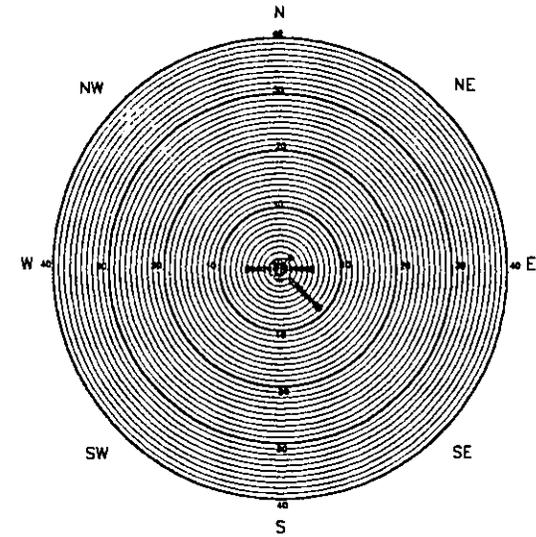


PORCENTAJE DE VIENTO EN CALMA  
( $V < 1\text{m/s}$ ): 54%

VIENTOS CON  $V > 1\text{m/s}$ :  
Resumen de direcciones

N:1%  
NE:17%  
E:13%  
SE:5%  
S:1%  
SW:1%  
W:7%  
NW:1%

**FIGURA 13**  
ROSA DE LOS VIENTOS  
ESTACION CADE



PORCENTAJE DE VIENTO EN CALMA  
( $V < 1\text{m/s}$ ): 75%

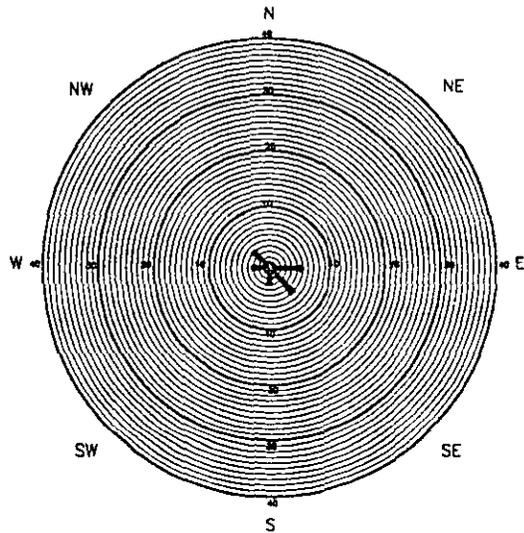
VIENTOS CON  $V > 1\text{m/s}$ :  
Resumen de direcciones

N:1%  
NE:2%  
E:5%  
SE:9%  
S:1%  
SW:1%  
W:5%  
NW:1%

**CONVENCIONES**

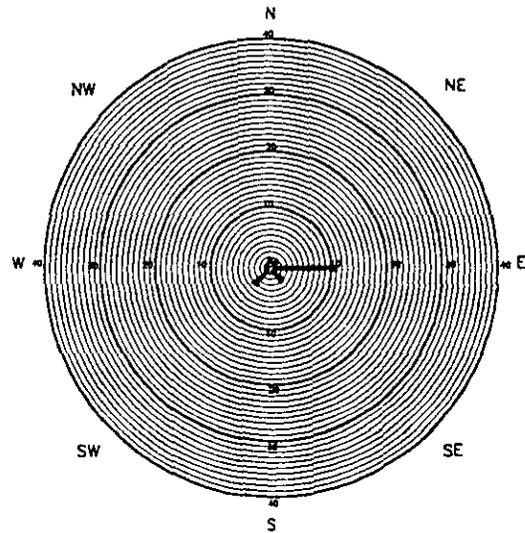
1a2 m/s ————  
2a3 m/s ————  
3a4 m/s ————  
4a5 m/s ————  
5a6 m/s ————  
Mas de 6 m/s ————

**FIGURA 14**  
ROSA DE LOS VIENTOS  
ESTACION RCN



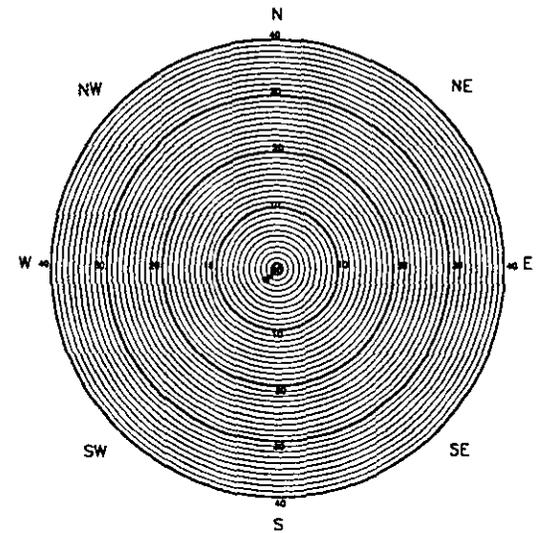
PORCENTAJE DE VIENTO EN CALMA ( $V < 1\text{m/s}$ ): 83%	
VIENTOS CON $V > 1\text{m/s}$ : Resumen de direcciones	
N:	0%
NE:	0%
E:	5%
SE:	5%
S:	2%
SW:	0%
W:	2%
NW:	3%

**FIGURA 15**  
ROSA DE LOS VIENTOS  
ESTACION UNIVERSIDAD NACIONAL



PORCENTAJE DE VIENTO EN CALMA ( $V < 1\text{m/s}$ ): 82%	
VIENTOS CON $V > 1\text{m/s}$ : Resumen de direcciones	
N:	1%
NE:	1%
E:	11%
SE:	2%
S:	0%
SW:	3%
W:	0%
NW:	0%

**FIGURA 16**  
ROSA DE LOS VIENTOS  
ESTACION UNIVERSIDAD SANTO TOMAS



PORCENTAJE DE VIENTO EN CALMA ( $V < 1\text{m/s}$ ): 98%	
VIENTOS CON $V > 1\text{m/s}$ : Resumen de direcciones	
N:	0%
NE:	0%
E:	0%
SE:	0%
S:	0%
SW:	2%
W:	0%
NW:	0%

CONVENCIONES	
1 a 2 m/s	▬
2 a 3 m/s	▬▬
3 a 4 m/s	▬▬▬
4 a 5 m/s	▬▬▬▬
5 a 6 m/s	▬▬▬▬▬
Mas de 6 m/s	▬▬▬▬▬▬

Tabla 11. Distribución de la dirección del viento a diferentes horas del día

HORA	Estación	Dirección	Estación	Dirección	Estación	Dirección
1:00 A.M.	BOSQUE ECI CORPAS ENGATIVÁ	W N NE NE	SANTO TOMÁS RCN UNIVERSIDAD NACIONAL CADE	E NW	SAN JUAN DE DIOS SONY CENTRAL DE MEZCLAS CAZUCÁ	SW SW
3:00 A.M.	BOSQUE ECI CORPAS ENGATIVÁ	W N NE NE	SANTO TOMÁS RCN UNIVERSIDAD NACIONAL CADE	NE E NW NW	SAN JUAN DE DIOS SONY CENTRAL DE MEZCLAS CAZUCÁ	SE
5:00 A.M.	BOSQUE ECI CORPAS ENGATIVÁ	W N NE NE	SANTO TOMÁS RCN UNIVERSIDAD NACIONAL CADE	NE E NW NW	SAN JUAN DE DIOS SONY CENTRAL DE MEZCLAS CAZUCÁ	SE
7:00 A.M.	BOSQUE ECI CORPAS ENGATIVÁ	NW N NE NE	SANTO TOMÁS RCN UNIVERSIDAD NACIONAL CADE	NW NW	SAN JUAN DE DIOS SONY CENTRAL DE MEZCLAS CAZUCÁ	SE
9:00 A.M.	BOSQUE ECI CORPAS ENGATIVÁ		SANTO TOMÁS RCN UNIVERSIDAD NACIONAL CADE	SE	SAN JUAN DE DIOS SONY CENTRAL DE MEZCLAS CAZUCÁ	S SE SE SE
11:00 A.M.	BOSQUE ECI CORPAS ENGATIVÁ	SW SE SE SE	SANTO TOMÁS RCN UNIVERSIDAD NACIONAL CADE	E SE	SAN JUAN DE DIOS SONY CENTRAL DE MEZCLAS CAZUCÁ	S SE SE SE
13:00 P.M.	BOSQUE ECI CORPAS ENGATIVÁ	SE	SANTO TOMÁS RCN UNIVERSIDAD NACIONAL CADE		SAN JUAN DE DIOS SONY CENTRAL DE MEZCLAS CAZUCÁ	SE
15:00 P.M.	BOSQUE ECI CORPAS ENGATIVÁ	SW SE	SANTO TOMÁS RCN UNIVERSIDAD NACIONAL CADE		SAN JUAN DE DIOS SONY CENTRAL DE MEZCLAS CAZUCÁ	S SE
17:00 P.M.	BOSQUE ECI CORPAS ENGATIVÁ	SW	SANTO TOMÁS RCN UNIVERSIDAD NACIONAL CADE	SE E SE	SAN JUAN DE DIOS SONY CENTRAL DE MEZCLAS CAZUCÁ	S S S
19:00 P.M.	BOSQUE ECI CORPAS ENGATIVÁ	SW SE E	SANTO TOMÁS RCN UNIVERSIDAD NACIONAL CADE	SE	SAN JUAN DE DIOS SONY CENTRAL DE MEZCLAS CAZUCÁ	S S S

De acuerdo con la tabla 11, en las primeras horas del día entre la 1 y las 7, la dirección de los vientos en las estaciones del norte y centro tienen claro predominio del norte, noreste y noroeste, mientras que en el sur, sólo la estación Central de Mezclas presenta vientos con una dirección predominante, siendo ésta del sureste. En las otras estaciones del área la dirección del viento es variable. A las 9 hay un cambio notorio, con gran variabilidad en la dirección del viento, en las zonas norte y centro, mientras que en el sur los vientos predominantes son del sur y sureste. A partir de las 11 en el norte los vientos son del sureste excepto en la estación El Bosque donde son del suroeste. En el centro la dirección del viento es muy variable hasta las 17 cuando aparecen vientos del sureste. En el sur, desde las 9 los vientos son del sureste y aunque entre las 13 y las 15 es variable, desde las 17 el viento viene claramente del sur.

En resumen, vientos con dirección del noreste, norte, noroeste y oeste se presentan únicamente en el norte y centro de la ciudad y solamente entre la 1 y las 7 horas. Sin embargo, y a pesar de la gran variabilidad presente a lo largo del día, la dirección predominante del viento en la ciudad es del sur y sureste.

#### - Otras mediciones

Otros parámetros meteorológicos con registros horarios para octubre, noviembre y diciembre de 1997 son temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y radiación. Estos han sido medidos en las estaciones Escuela de Ingeniería y Central de Mezclas, en los extremos norte y sur del área urbana. No hay información dentro de la ciudad.

La temperatura, en las dos estaciones, se mide a los 2m, 8m y 20 m (TD2, TD8, TD20) sobre el nivel del piso. En la estación del norte, Escuela de Ingeniería, figura 17, las temperaturas mínimas, promedios horarios para el periodo de análisis, octubre, noviembre y diciembre de 1997, son de 9.6, 10 y 10.5 °C respectivamente, a las 5 de la mañana, en tanto que las máximas temperaturas que ocurren entre las 12 y 13 horas son de 22.4, 21.7 y 21.2 °C. En la estación del sur, figura 18, los valores mínimos son de 8.4, 8.7 y 9.0 °C, y las temperaturas máximas de 18.2, 16.4, y 16.1 °C.

La Escuela de Ingeniería presenta unos niveles de humedad que oscilan entre el 45.5% y el 92.4%, mientras que en la Central de Mezclas los porcentajes mínimo y máximo de humedad relativa varían entre el 50.0% y el 74.4%, figura 19. De manera correspondiente los niveles de presión, figura 20, en la Escuela varían entre 528.7 mm y 550.8 mm de Hg, mientras que en la estación Central de Mezclas los niveles son de 559.1 mm de Hg y los 573 mm.

Sobre la distribución horaria de estos valores, en las primeras horas del día, hasta después de las 5 de la mañana, la humedad, presión y temperatura presentan niveles relativamente constantes. A partir de esa hora inicia el ascenso en la temperatura y el descenso en la humedad relativa y la presión hasta entre las doce y las trece horas, donde se alcanzan los valores máximo de temperatura y mínimos de presión y humedad a partir de lo cual se inicia el proceso inverso.

Los niveles de radiación son ligeramente superiores en la Escuela de Ingeniería hasta las 9 horas, y ligeramente inferiores, con relación a los de la estación Central de Mezclas, desde las 13 horas. Sobre la hora de mayor radiación es a las 10 para la Central de Mezclas y a las 13 horas para la Escuela. Figura 21.

Si bien se observó diferencia en el comportamiento de los parámetros meteorológicos, a lo largo del día, se sale del alcance de este trabajo establecer posibles diferencias meteorológicas entre el norte y el sur de la ciudad.

### 3.4 CALIDAD DEL AIRE

A partir de octubre de 1997 los registros de esta red constituyen la información oficial de la ciudad sobre calidad del aire. Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron los datos horarios obtenidos de la red en los meses de octubre, noviembre y diciembre de 1997.

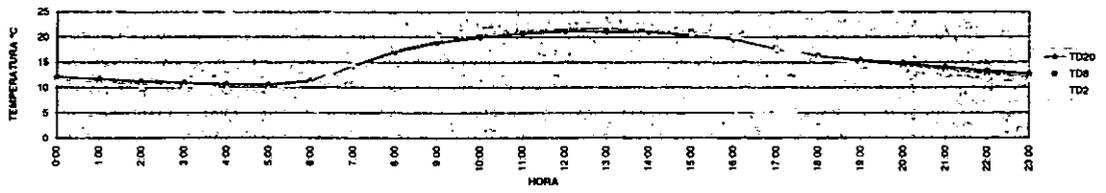
Previo a la utilización de esta información, se verificó que, en cada caso, la distribución de frecuencias acumuladas de los datos se asimilara a una distribución log-normal. Esto por cuanto las concentraciones de contaminantes del aire son aproximadamente lognormalmente distribuidas para cualquiera de ellos, lo que ha sido confirmado en estudios realizados en diversas ciudades y aplica para cualquier intervalo de tiempo (Ott,1995). Por lo anterior, es un criterio para asegurar que los registros presentan el comportamiento esperado( Fuentes,1989).

Para el efecto se aplicó la metodología propuesta por Ott, 1995: se elaboraron las gráficas de la concentración contra la distribución de frecuencia acumulada, en papel logarítmico-probabilístico para observar la correspondencia a una relación lineal. Luego de esto, se realizó la comprobación calculando, para cada serie de datos, la correlación entre la variable aleatoria normalmente distribuida  $Z = (\ln x - \mu) / \sigma$  y el  $\ln x$ , verificando que, en cada caso, el resultado fuera muy cercano a 1.

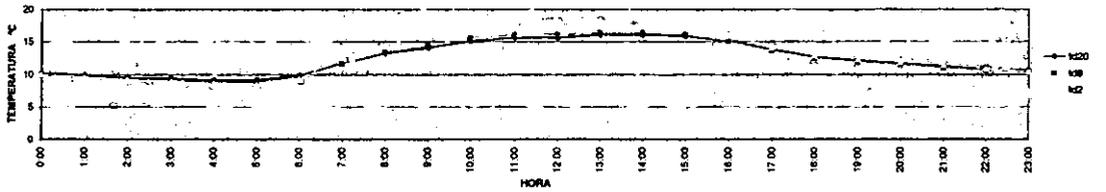
En la tabla 12 se presentan los resultados para PM-10, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO y O<sub>3</sub>. Para este ejercicio se escogieron de cada serie de datos cinco valores de concentración de contaminante correspondientes a valores de Z cercanos a -2, -1, 0, 1, y 2 que a su vez corresponde a frecuencias acumuladas de 2.275%, 15.87%, 50%, 84.13% y 97.725%, respectivamente.

Los resultados obtenidos son cercanos e inclusive iguales a la unidad. Esto indica que se puede asumir que las series de datos utilizadas tiene una distribución de frecuencias lognormalmente distribuida.

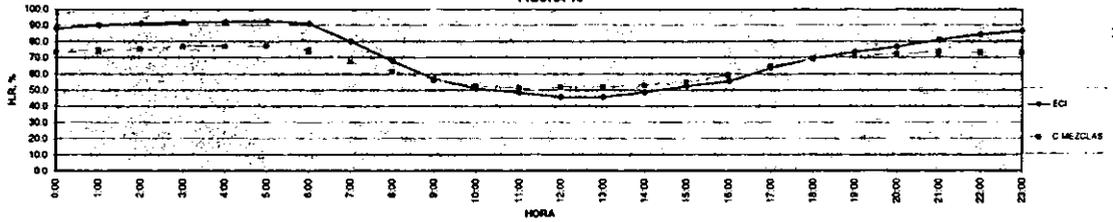
ESTACION ESCUELA DE INGENIERIA  
TEMPERATURA (C)  
FIGURA 17



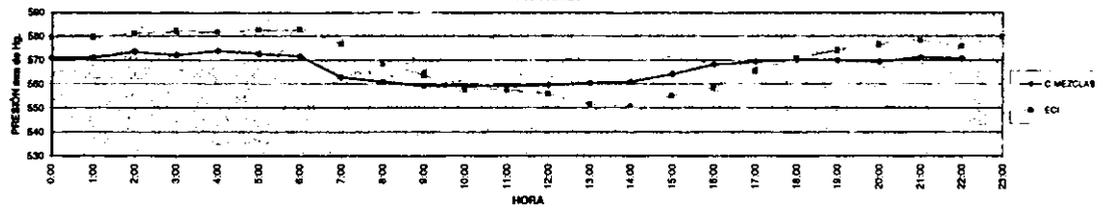
ESTACION CENTRAL DE MEZCLAS  
TEMPERATURA (C)  
FIGURA 18



ESTACIONES ESCUELA DE INGENIERIA Y CENTRAL DE MEZCLAS  
HUMEDAD RELATIVA %  
FIGURA 19



ESTACIONES ESCUELA DE INGENIERIA Y CENTRAL DE MEZCLAS  
PRESION ATMOSFERICA (mm de Hg)  
FIGURA 20



ESTACIONES ESCUELA DE INGENIERIA Y CENTRAL DE MEZCLAS  
RADIACION (W/m2)  
FIGURA 21

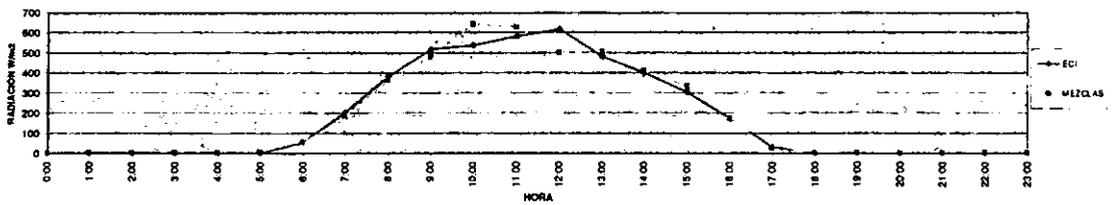


Tabla 12. Coeficiente de correlación logaritmo de la concentración-variable Z, de acuerdo con la distribución acumulativa de frecuencias de los parámetros medidos (distribución LOG-NORMAL)

Estación	Logaritmo de la concentración-variable Z					
	1.00	0.97	0.99	1.00	1.00	1.00
RCN	1.00	1.00				
Sony	1.00	1.00	0.97	1.00	1.00	1.00
S. Juan de Dios	1.00	1.00				
Engativá	1.00		0.99	1.00	1.00	
Cazucá	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Sto Tomás	1.00		1.00	1.00	1.00	
Corpas	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
CADE	1.00		1.00	1.00	1.00	
Bosque	1.00		1.00	1.00	1.00	
Universidad Nacional			0.99	1.00	1.00	1.00

### 3.4.1. Estudio por parámetro de calidad

#### A. Considerando valores promedio horario y eventos sobre valores límite

- i. Se calculó el valor promedio de cada parámetro en cada una de las estaciones, para cada hora del día, para todo el período de análisis. Los datos utilizados se presentan en el anexo 11.
- ii. Se calculó el valor de concentración de cada contaminante para el promedio de tiempo indicado en los valores límite, con el fin de determinar la ocurrencia de eventos superando tales valores

#### - CO

Los niveles de monóxido de carbono en la ciudad, figura 22 (valores promedio horario), son altos en la zona sur y en la zona central, con relación a los de la zona norte. El comportamiento de este contaminante a lo largo del día refleja su origen vehicular. Los niveles máximos diarios ocurren entre las siete y las ocho de la mañana, las siete para la zona sur y las ocho para la zona centro, lo cual se relaciona con las direcciones prevalecientes de flujo vehicular hacia los centros de comercio y negocios durante esas horas. El inicio del aumento en los niveles de concentración es a las cuatro horas en la zona sur, mientras que en el centro es a las cinco. En las horas de la tarde se presenta un nuevo aumento, por debajo de los niveles matinales, a las dieciocho horas en el centro y a las diecinueve en el sur.

El estándar de calidad de acuerdo con la normatividad colombiana, es de 13.1 ppm para la concentración de 8 horas, y de 43.7 ppm para la norma de 1 hora, valores que no fueron superados en ninguna de las estaciones.

Los niveles de concentración más altos para una hora se presentan en la estación Sony, 18.1 ppm, que está en un 58.6% por debajo de la norma, seguidos por un valor de 15.4 para las estaciones San Juan de Dios y RCN, correspondientes a un valor de 64.5% debajo de la norma.

Sobre los niveles de concentración para ocho horas, se presenta al sur en la estación Sony una concentración máxima de 9.51 ppm, en comparación con la norma de 13.1 ppm.

Los niveles en la zona norte son bajos, y presentan una distribución horaria relativamente constante.

### **- PARTÍCULAS MENORES DE 10 MICRÓMETROS**

En la figura 23 se observan las concentraciones de PM-10 a lo largo del día (promedios horarios), en las estaciones evaluadas. Los niveles de concentración se relacionan con las emisiones provenientes de la combustión y de diversos procesos industriales. Como se puede observar, el sur de la ciudad presenta las concentraciones más altas de partículas con relación a las reportadas para el centro y norte. Las zonas industriales presentan concentraciones mayores sobre otros usos del suelo, incluyendo la estación Corpas, la que a pesar de no encontrarse en una zona de uso industrial, reporta concentraciones o bien porque existan fuentes de emisión, como resultado del acelerado ritmo de crecimiento de la zona o bien como resultado de transporte atmosférico desde áreas industriales.

La norma colombiana para partículas suspendidas totales es de 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , para el promedio geométrico anual, y de 400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para el promedio de 24 horas. No existe norma específica para PM-10. Por lo anterior y para efectos de comparación, se utilizó la norma de la EPA que es de 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM-10, promedio de 24 horas, que para la altura de Bogotá, en términos de presión y temperatura, equivale a un estándar de 115  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

De acuerdo con lo anterior, las concentraciones de las estaciones RCN en el centro, Corpas y Engativá en el norte y occidente respectivamente, presentan valores por debajo de 115  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que las restantes presentan eventos de concentración mayores en los porcentajes que se observan en la tabla 13.

Tabla 13. Número de días con concentración de PM-10 superior a la norma

Estación	No de días con datos disponibles	No de días que presentan valores por arriba de 115 µg/m <sup>3</sup> .	% de días con concentraciones mayores de 115 µg/m <sup>3</sup> .
Cazucá	81	29	36
Sony	74	4	5
S. Juan de Dios	62	4	6
Sto Tomás	61	1	2
CADE	92	2	2

El área más crítica es la zona sur, en especial en el área de la estación Cazucá donde la norma se excedió en un 36% del total de días para los que se dispone de información. Esto se relaciona directamente con el uso del suelo y con los altos volúmenes de tráfico.

#### - BIÓXIDO DE AZUFRE

Los más altos niveles de bióxido de azufre de la ciudad, figura 24 (promedios horarios), corresponden a zonas industriales, independiente de su localización dentro de la ciudad. El bióxido de azufre es emitido principalmente por el sector industrial. La concentración máxima matutina se produce a las 7 horas. Su posterior descenso se relaciona con el cambio de patrones de circulación del viento. Es así como se presentan altos niveles en el área central, en la estación CADE, que se localiza en una de las mayores zonas industriales de la ciudad, al igual que en el sur, en las estaciones Sony y Cazucá. Ahora bien, en la zona norte se presenta alta concentración en el área de la estación Co\*p+5X que no se esperaría dado que aparentemente no es un área de uso industrial. Esto refleja que existen fuentes de emisiones importantes y que el uso del suelo en el área es mixto como consecuencia de un desarrollo no planificado. Otra posible causa es el transporte de contaminantes desde las áreas industriales.

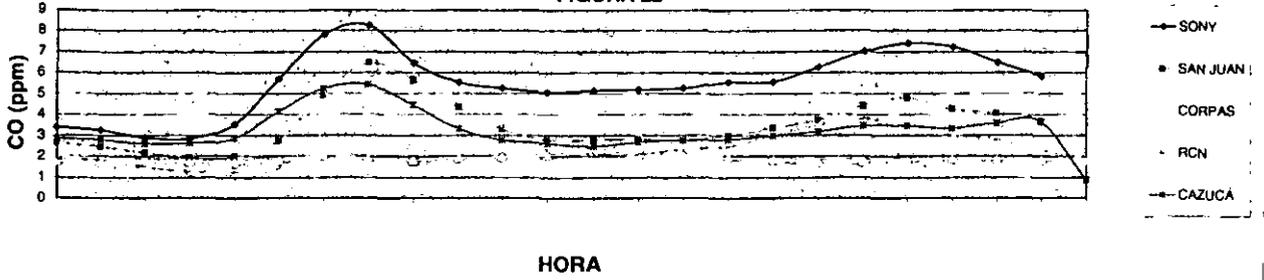
En el área del centro, en zonas diferentes a las industriales, los niveles de SO<sub>2</sub> son comparativamente más bajos con relación a los anteriores y en el norte y occidente los niveles son muy bajos.

Con relación a la normatividad vigente la norma no se supera ni para el promedio de 24 horas ni para el correspondiente a 3 horas en ninguna de las estaciones monitoreadas.

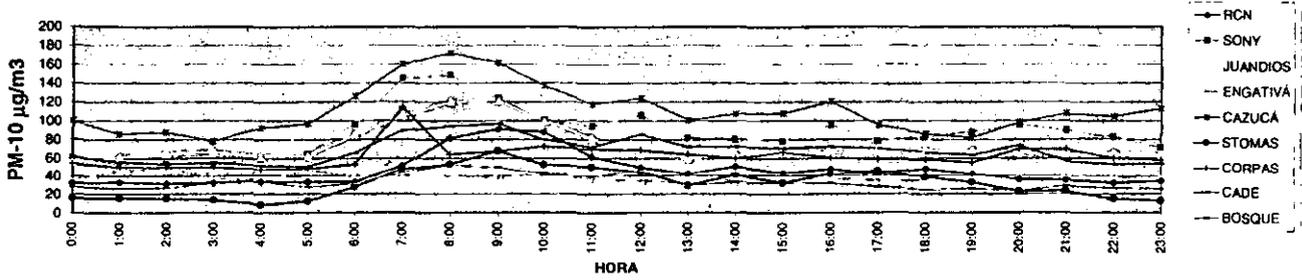
#### - OXIDOS DE NITRÓGENO

La red de monitoreo mide las concentraciones de los óxidos de nitrógeno como NO<sub>x</sub>, NO y NO<sub>2</sub>, de manera que se puede observar la evolución de estos a las diferentes horas del día en las distintas áreas de la ciudad. Figuras 25, 26 y 27.

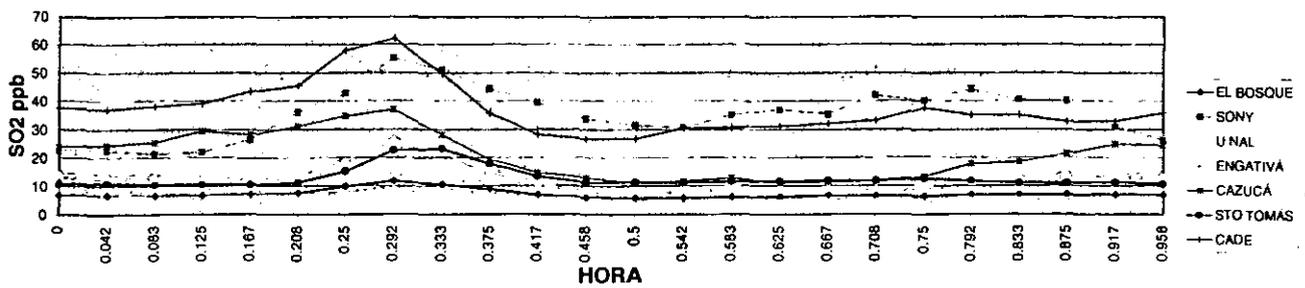
CO  
FIGURA 22



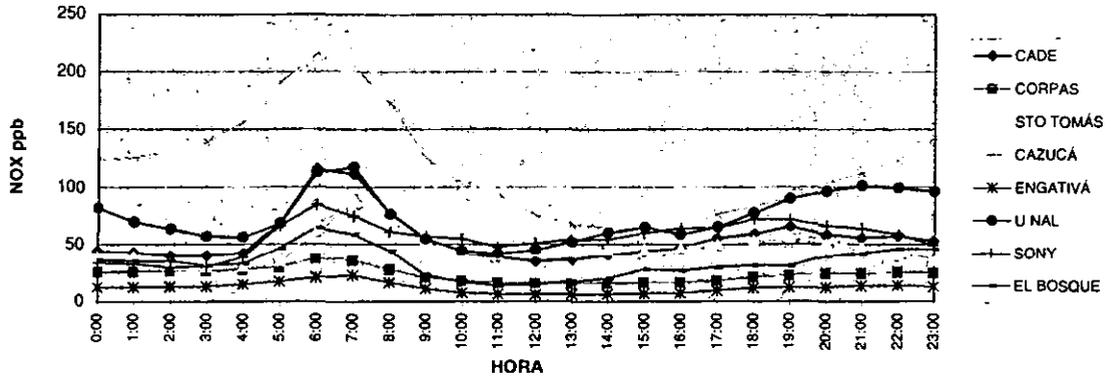
PM-10  
FIGURA 23



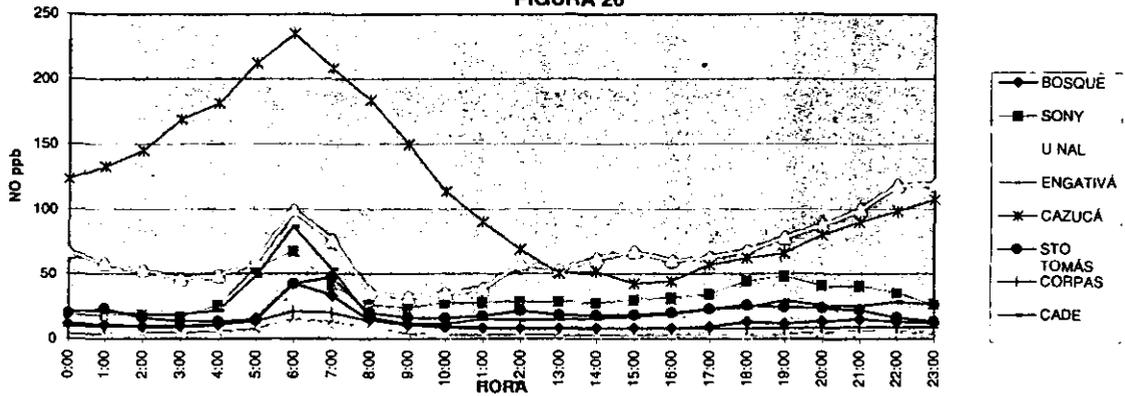
SO2  
FIGURA 24



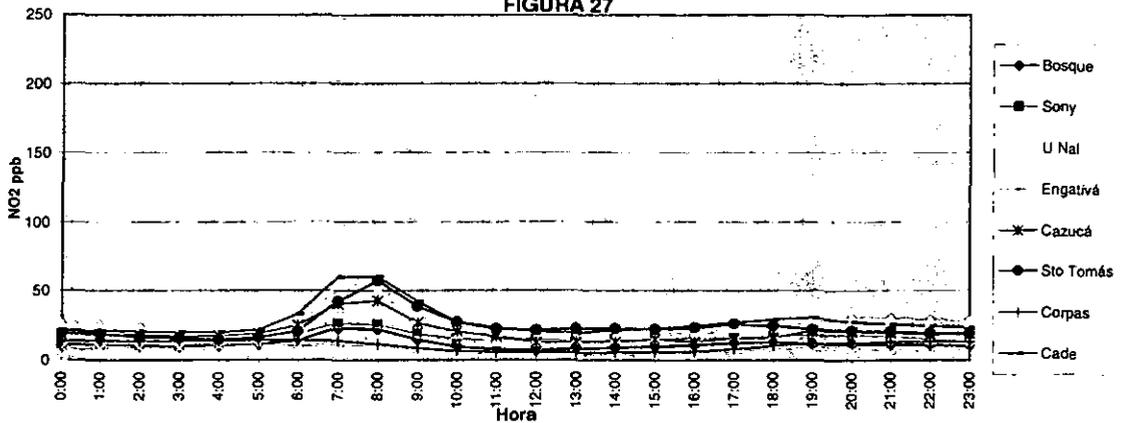
NOX  
FIGURA 25



NO  
FIGURA 26



NO<sub>2</sub>  
FIGURA 27



Son fuentes de óxidos de nitrógeno la industria y el transporte. Su evolución a lo largo del día refleja su participación en la actividad fotoquímica dando origen a contaminantes secundarios.

Las concentraciones más elevadas de NO<sub>x</sub> ocurren en el sur de la ciudad, exactamente en el área de Cazucá y prácticamente doblan, en las horas pico, la concentración en las estaciones que le siguen: CADE y Universidad Nacional en la zona centro.

No se puede decir explícitamente que toda la zona sur presenta altas concentraciones de NO<sub>x</sub> pues es muy grande la diferencia de los resultados obtenidos entre las estaciones.

Tampoco se puede afirmar que la zona centro es alta, en general, en niveles de NO<sub>x</sub> por la misma razón. Los resultados obtenidos en el norte y occidente reflejan las más bajas concentraciones de la ciudad.

De monóxido de nitrógeno, las concentraciones mayores se presentan en el sur, en el área de la estación Cazucá, y como en el caso anterior con una gran diferencia con relación a la estación Sony, que es la más cercana. El segundo nivel de concentración se localiza en el centro, exactamente en el área de las estaciones CADE y Universidad Nacional y de igual forma que en el caso anterior, es grande la diferencia encontrada con otras estaciones del área central. Los niveles del norte y occidente son los más bajos de la ciudad.

El dióxido de nitrógeno presenta las concentraciones mayores en el centro de la ciudad, donde se presentan las velocidades del viento más bajas en relación con otras zonas. Esto indica una que la velocidad del viento incide en la actividad fotolítica. En el sur las concentraciones corresponden a un nivel intermedio pero siempre por encima de las estaciones del norte y occidente que nuevamente son las más bajas.

La norma colombiana que se ha establecido para el promedio aritmético anual de NO<sub>x</sub>, es de 100 µg/m<sup>3</sup>, valor que con los datos utilizados en este trabajo no se puede evaluar. Para tener un punto de referencia se compararon los resultados obtenidos con la norma mexicana la cual establece una concentración de 0.21 ppm para 1 hora, para NO<sub>2</sub>.

En todos los casos las concentraciones se presentan por debajo de los valores límite correspondientes

#### - **HIDROCARBUROS**

Los hidrocarburos se han evaluado en dos grandes grupos diferenciados como metano, figura 28, e hidrocarburos no metánicos, figura 29. Esta división se hace considerando la reactividad del hidrocarburo con otros constituyentes de la atmósfera. El metano es el más estable, es decir, el que menos reacciona, mientras que en el grupo de los hidrocarburos no metánicos, se encuentran especies muy reactivas.

La presencia de estos contaminantes en la atmósfera se debe a hidrocarburos no quemados, especies formadas durante la combustión y compuestos orgánicos volátiles (COV) emitidos por procesos industriales. La red de monitoreo mide hidrocarburos en dos estaciones: Sony y RCN. La concentración de CH<sub>4</sub> a lo largo del día en la estación RCN tiene poca variabilidad. No así en la estación Sony, donde se presenta un pico a las 5 horas que refleja emisiones por procesos industriales. Luego de un descenso se observa recuperación a partir de las 18 horas.

La evolución horaria de hidrocarburos no metánicos se atribuye tanto a vehículos como a industria. Se presenta un pico a las 6 horas en la estación Sony y a las 7 horas en la estación RCN. Los valores mínimos se presentan a horas de intensa actividad fotoquímica, cuando los HC han reaccionado para formar otros compuestos. Hay recuperación en horas de la noche.

La diferencia de niveles de concentración de las dos estaciones puede ser atribuida a la industria localizada en el área de la estación Sony. Las dos estaciones se localizan en zonas de alto tráfico vehicular.

No existe norma colombiana para hidrocarburos.

#### - OZONO

Los niveles de ozono han sido registrados en las estaciones Cazucá, Sony y Universidad Nacional. El comportamiento en las tres a lo largo del día es muy similar. En la figura 30 se observa la variación horaria del ozono (promedio para cada hora). El aumento en concentraciones de ozono es consecuencia de la acumulación de sus precursores y de la radiación solar. El valor máximo se da a las 9 horas cuando empieza el descenso. Si bien para el promedio de cada hora no se supera la norma, se presentan eventos en los que esto sí sucede.

Aunque la Universidad Nacional presenta los valores más altos, en las tres estaciones se supera la norma. Es de anotar que la norma para una hora, de acuerdo con el decreto reglamentario, sólo puede ser excedida una vez al año y durante los meses del muestreo se observó que la norma fue superada durante 34 horas, no sucesivas, en la estación Cazucá, 54 horas en la estación Sony, y 62 en la Universidad Nacional. En la tabla 14 se observa el porcentaje de horas superando la norma en cada estación.

Tabla 14. Horas superando la norma de O<sub>3</sub>

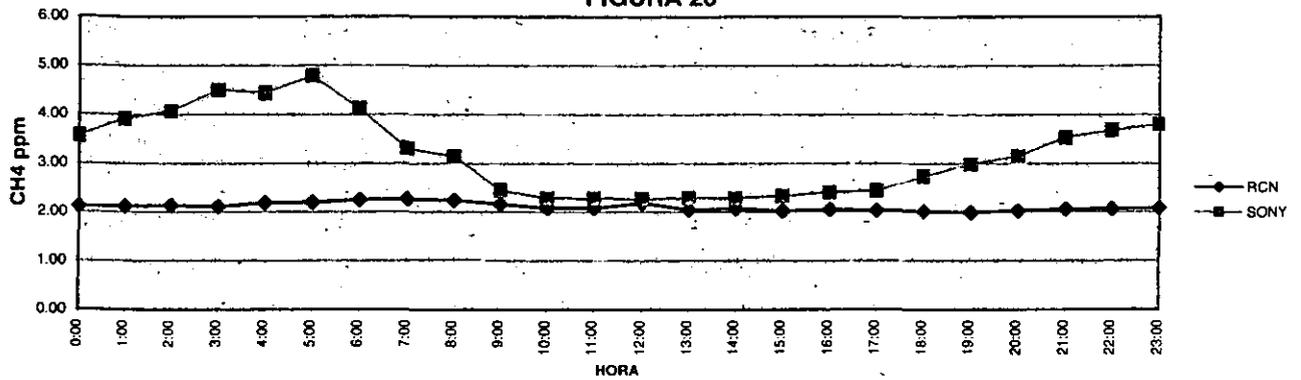
Estación	Cazucá	Sony	Universidad Nacional
No. total de horas con datos	2147	1897	2108
No. de horas superando norma	34	54	62
Porcentaje(%)	1.6	2.8	2.9

En las figuras 31, 32 y 33 se presentan de manera simultanea las variaciones horarias de los valores de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{O}_3$  en estas estaciones. La máxima concentración de  $\text{O}_3$  se presenta con valores bajos de  $\text{NO}_x$ , a las 9 horas. Con el descenso del ozono se observa recuperación de los óxidos de nitrógeno consecuencia de la disminución de luz solar que promueva las reacciones fotoquímicas. Por otra parte, mientras en Cazucá los niveles de  $\text{NO}_2$  y  $\text{O}_3$ , en términos de concentración, son similares, en la estación Universidad Nacional y más aún en la estación Sony, existen niveles muy superiores de  $\text{O}_3$  con relación al  $\text{NO}_2$  lo que puede ser indicativo de la presencia de otros componentes fotorreactivos, especialmente en la estación Sony, tales como hidrocarburos no metánicos y óxidos de azufre.

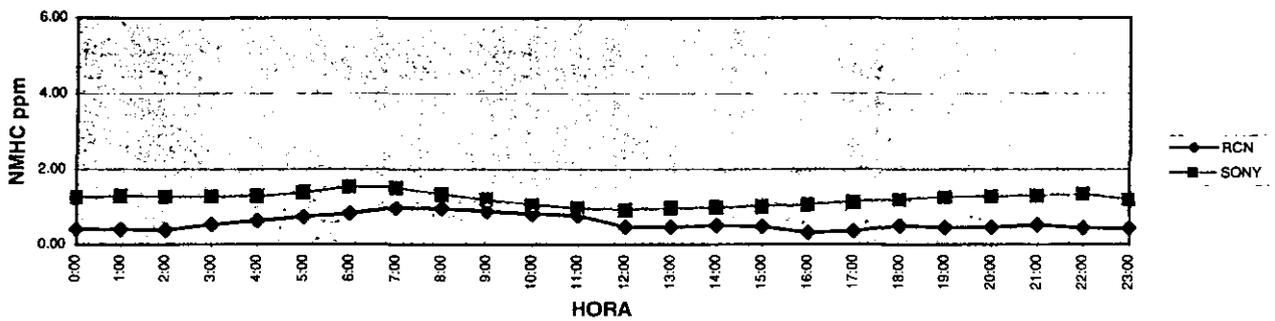
#### **B. Considerando valores medios obtenidos para los promedios de tiempo considerados para los valores límite**

A partir del cálculo de concentraciones para los promedios de tiempo considerados en los valores de referencia, se calcularon los promedios de esas concentraciones con el fin de establecer si se presentan valores promedio por encima de tales límites de referencia. Tabla 15. Con relación a las  $\text{PM}_{10}$ , el valor de  $115 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el promedio de 24 horas es superada en las estaciones Cazucá, Sony, San Juan de Dios, CADE y Santo Tomás. Para ningún otro parámetro se presentan valores medios por encima de la norma respectiva.

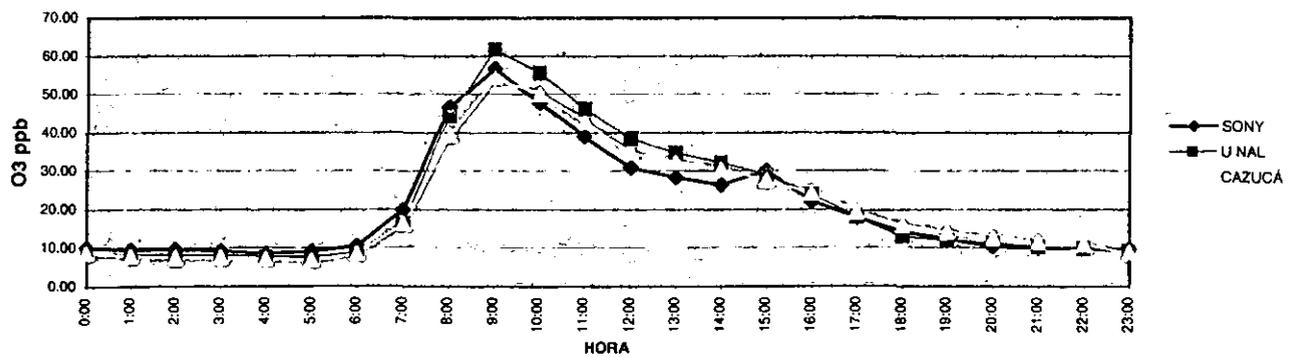
CH4  
FIGURA 28



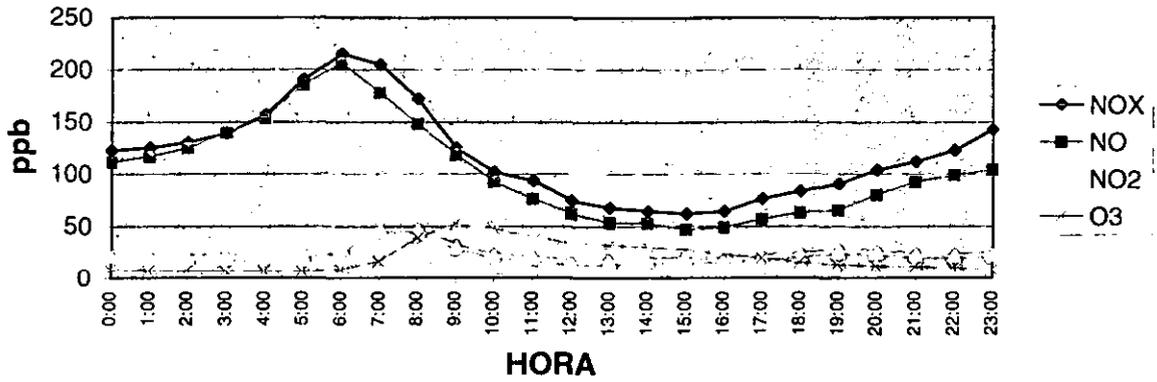
NMHC  
FIGURA 29



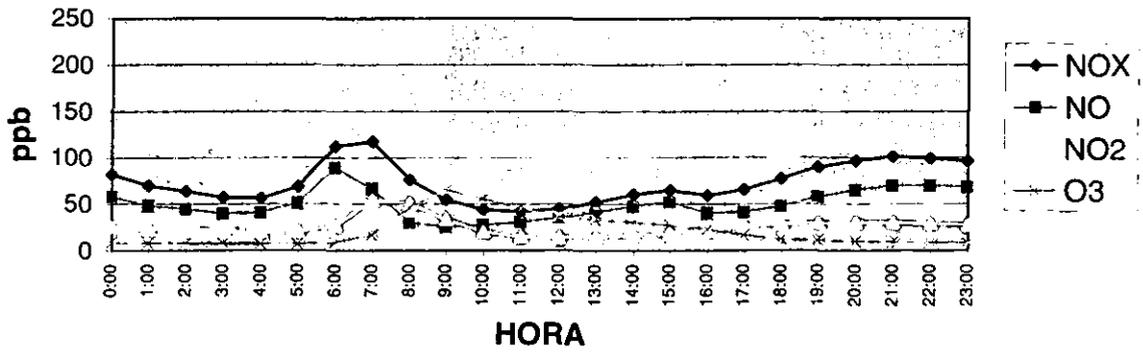
OZONO  
GRAFICO 30



NEBLUMO CAZUCÁ  
FIGURA 31



NEBLUMO UNIVERSIDAD NACIONAL  
FIGURA 32



NEBLUMO SONY  
FIGURA 33

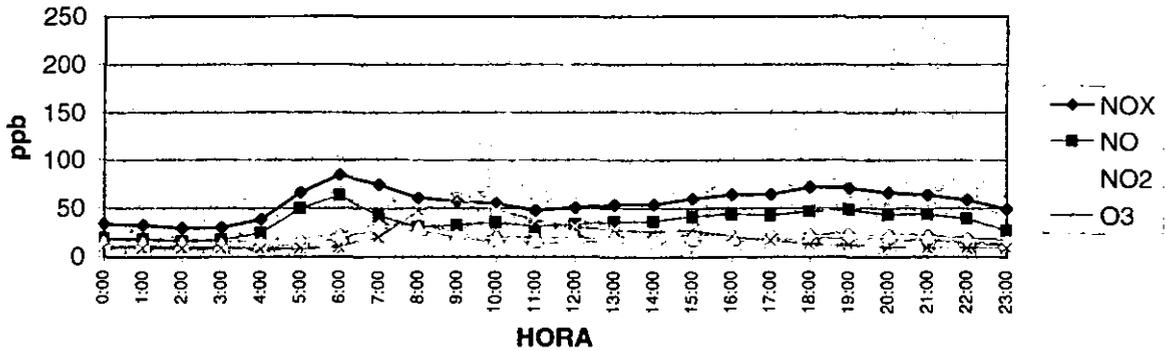


TABLA 15. VALORES MEDIOS OBTENIDOS CON RELACION A LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA

PARÁMETRO	VALOR LIMITE DE REFERENCIA	ESTACIÓN								
		CAZUCA	SONY	S JUAN DIOS	RCN	CADE	UNIV. NACIONAL	S. TOMÁS	BOSQUE	CORPAS
PM-10	115 ug/m3, 24 hr	184.42	128	137.95	83.58	121.08		136.5		96.58
SO2	152.8 ppb, 24 hr	21	34	nd	nd	37	13	13	7	nd
	573.1 ppb, 3 hr	34	50	nd	nd	57	22	21	11	nd
CO	13.1 ppm, 8 hr	4.07	6.02	4.28	3.6	nd	nd	nd	nd	2.09
	43.7 ppm, 1 hr	6.7	9.5	7.9	6.9	nd	nd	nd	nd	2.5
O3	86.6 ppb, 1 hr	61	60	nd	nd	nd	72	nd	nd	nd
NO2	0.25 ppm, 1 hr									

### 3.4.2 Zonificación de la ciudad para la determinación del índice de calidad

La propuesta de zonificación para la ciudad es la siguiente, figura 34:

- **Zona sur:**

Su calidad se reportará por las estaciones Cazucá, Sony y San Juan de Dios. En la zona sur es importante la industria y son altos el tránsito automotor y la densidad de población. La velocidad de los vientos es comparativamente más alta que en la zona central, con excepción de la estación Sony. La dirección del viento es del sur y sureste principalmente. Presenta altas concentraciones de partículas, CO, NO<sub>x</sub>, NO e hidrocarburos.

- **Zona Central:**

El reporte de calidad de aire estará definido por las estaciones CADE, Universidad Nacional, RCN y Santo Tomás.

En estas estaciones la velocidad del viento es sensiblemente menor que en las zonas norte y sur. La dirección del viento es altamente variable. El uso del suelo es mixto existiendo una de las mayores áreas industriales de la ciudad. Los niveles de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> son los más altos y no presenta niveles bajos de los demás contaminantes.

- **Zona norte:**

Incluirá parte de la zona occidental de la ciudad y se definirá con base en los resultados obtenidos en las estaciones Bosque, Corpas y Engativá. En general el área norte tiene menor densidad de población. La industria que se asienta en ella es poca y está en general dispersa. Presenta las menores concentraciones de los parámetros medidos, con excepción del SO<sub>2</sub> y partículas en la estación Corpas.

### 3.5 IMPORTANCIA RELATIVA DE LOS CONTAMINANTES DEL AIRE EN LA CIUDAD

Con la información disponible sobre los niveles de contaminantes, se estableció el peso relativo de los mismos, así como el peso relativo de cada zona para el período de análisis. Para esto se consideró (IMP, Laboratorio Los Alamos, 1994) la ocurrencia de eventos en los que se superó el valor de referencia, el valor máximo registrado en el período de análisis y el nivel de toxicidad de cada uno de los contaminantes. No se consideró la tendencia por no disponer de datos.

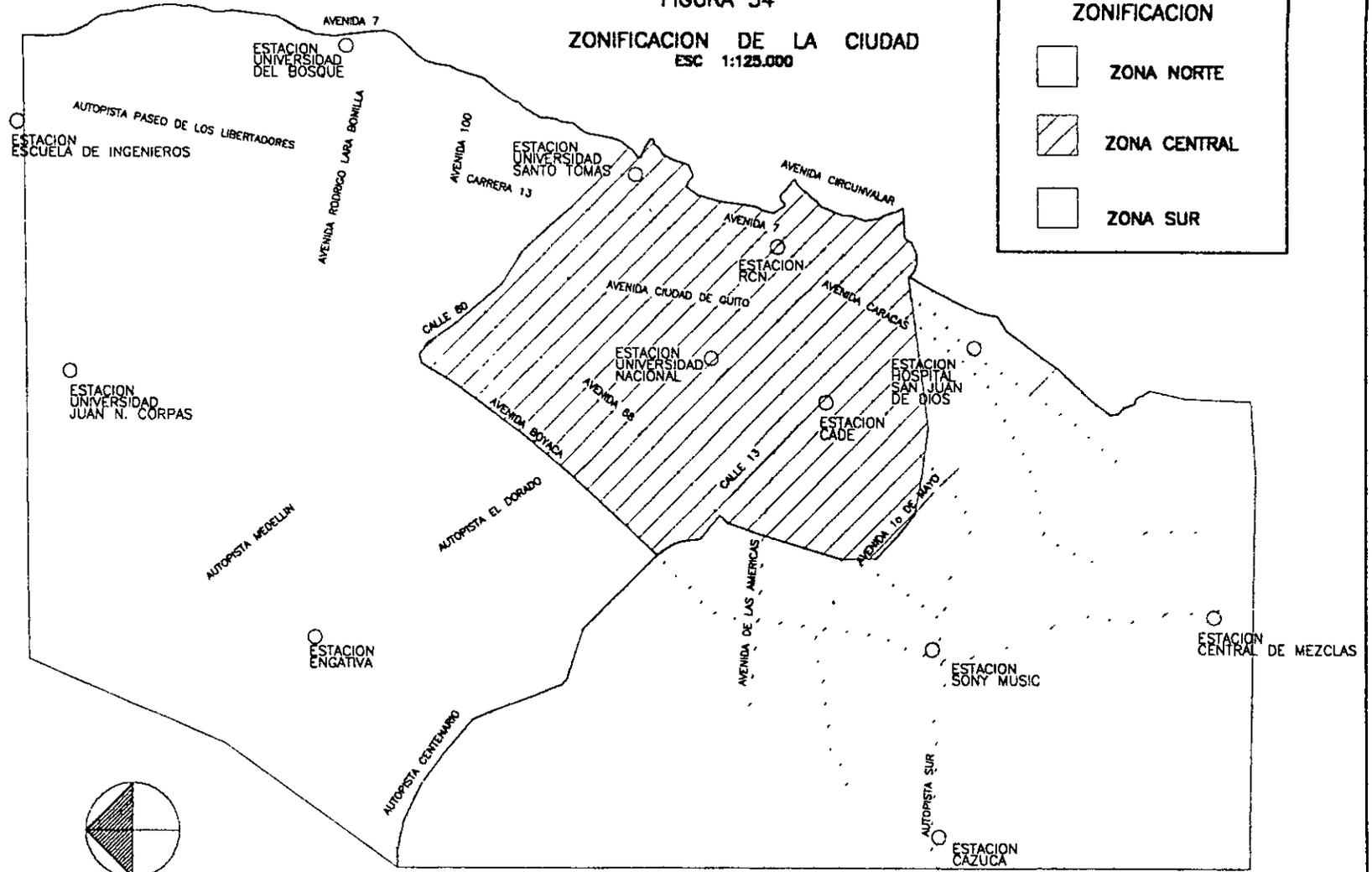
a. Ocurrencia de eventos en los que se superan los valores de referencia

Se determinó el porcentaje de eventos por encima del valor límite, con relación al número total de mediciones, durante todo el período de análisis. Luego, los datos obtenidos se normalizaron con relación al menor utilizando la siguiente ecuación:

FIGURA 34  
 ZONIFICACION DE LA CIUDAD  
 ESC 1:125.000

**ZONIFICACION**

	ZONA NORTE
	ZONA CENTRAL
	ZONA SUR



$$F = \frac{(\%_i - \%_{menor})}{\left( \frac{\sum (\%_i - \%_{menor})^2}{\text{No. de estaciones analizadas}} \right)}$$

donde,

- F, es el factor de ponderación
- $\%_i$ , es el porcentaje de eventos en los que se superó la norma en relación a todo el período de análisis, para cada una de las estaciones
- $\%_{menor}$ , corresponde al menor porcentaje de eventos sobre el valor de referencia

b. Valores máximos alcanzados por cada parámetro

Se tomó el valor máximo absoluto reportado para cada parámetro en cada estación durante el período de muestreo. Los valores obtenidos se normalizaron con relación al menor.

$$F = \frac{(VM_i - VM_{menor})}{\left( \frac{\sum (VM_i - VM_{menor})^2}{\text{No. de estaciones analizadas}} \right)}$$

Donde,

- F, es el factor de ponderación
- VM es el mayor valor registrado por estación
- $VM_{menor}$  lores mayores

c. Factores de ponderación considerando la toxicidad relativa de los contaminantes

Los valores de referencia utilizados corresponden a normas las cuales se establecen con base en la toxicidad del contaminante. De esta manera queda incluida la consideración de toxicidad relativa de los contaminantes.

El cálculo de los factores de ponderación se realizó para los parámetros CO, PM-10, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>.

Los factores de ponderación obtenidos, considerando el número de días sobre la norma, se presentan en la tabla 16. Como se aprecia, el mayor peso lo tiene el O<sub>3</sub> seguido por las partículas.





FIGURA 37  
 FACTORES DE PONDERACION  
 PM-10  
 SANTA FE DE BOGOTA  
 ESC 1:125.000

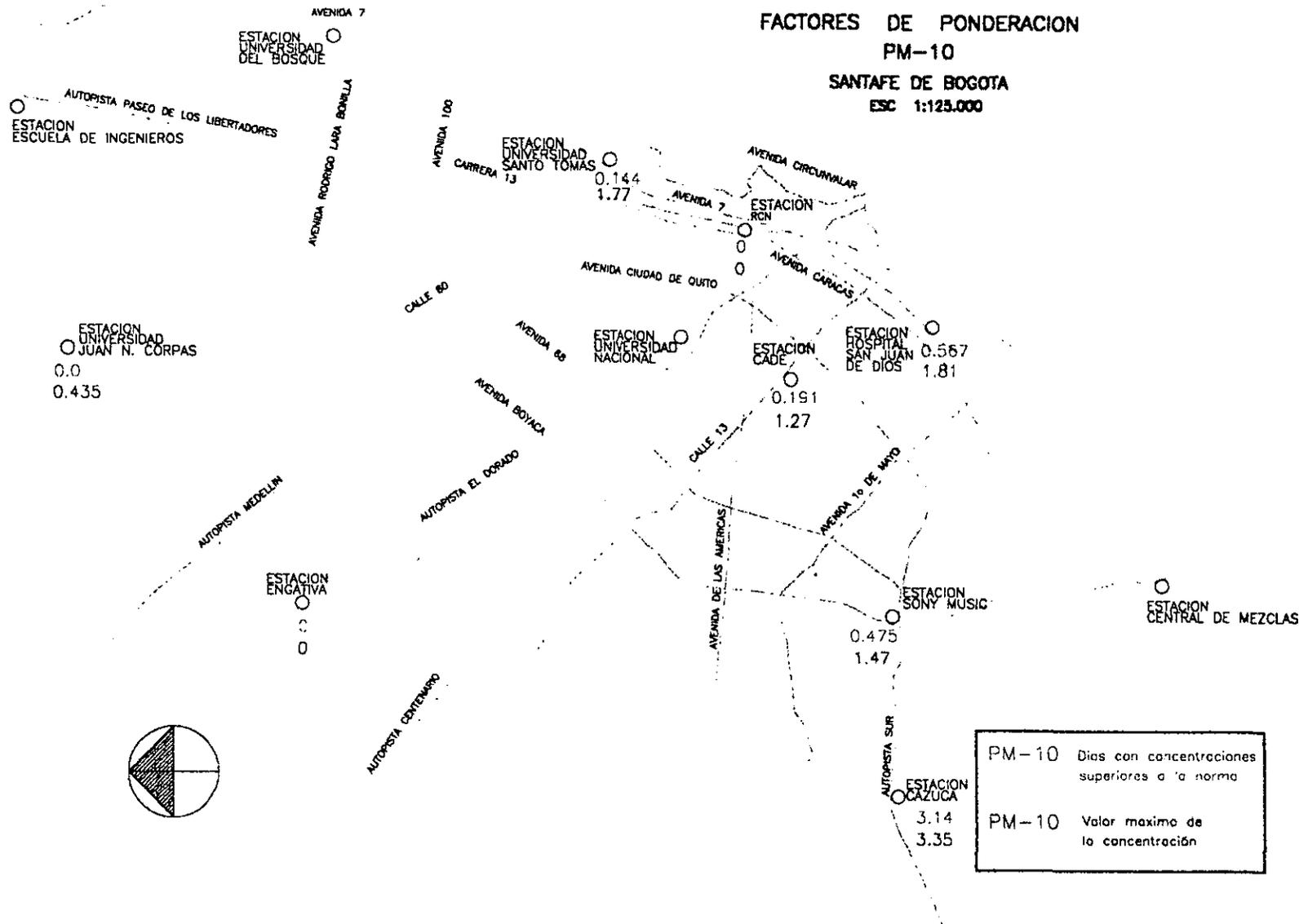
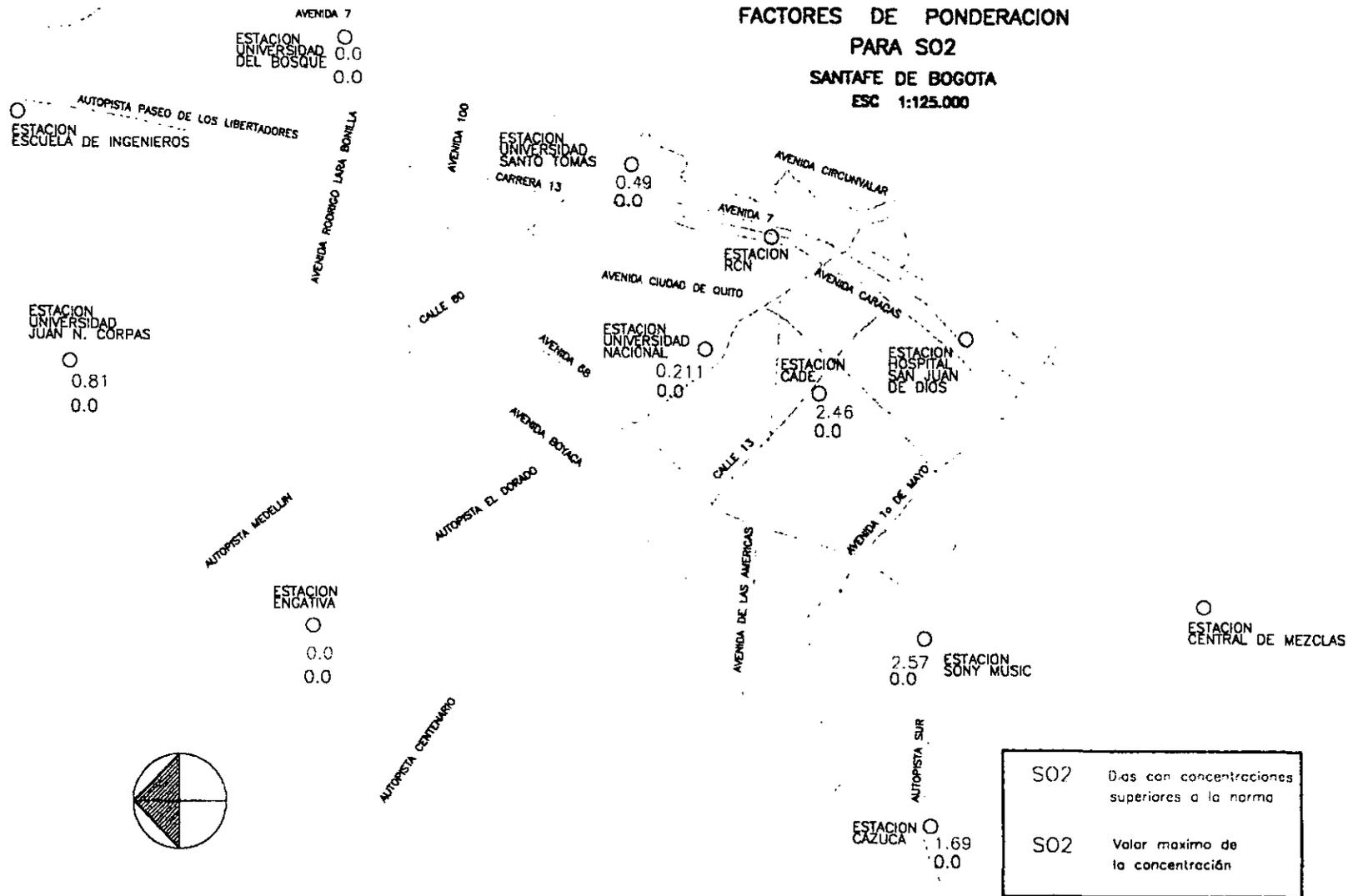
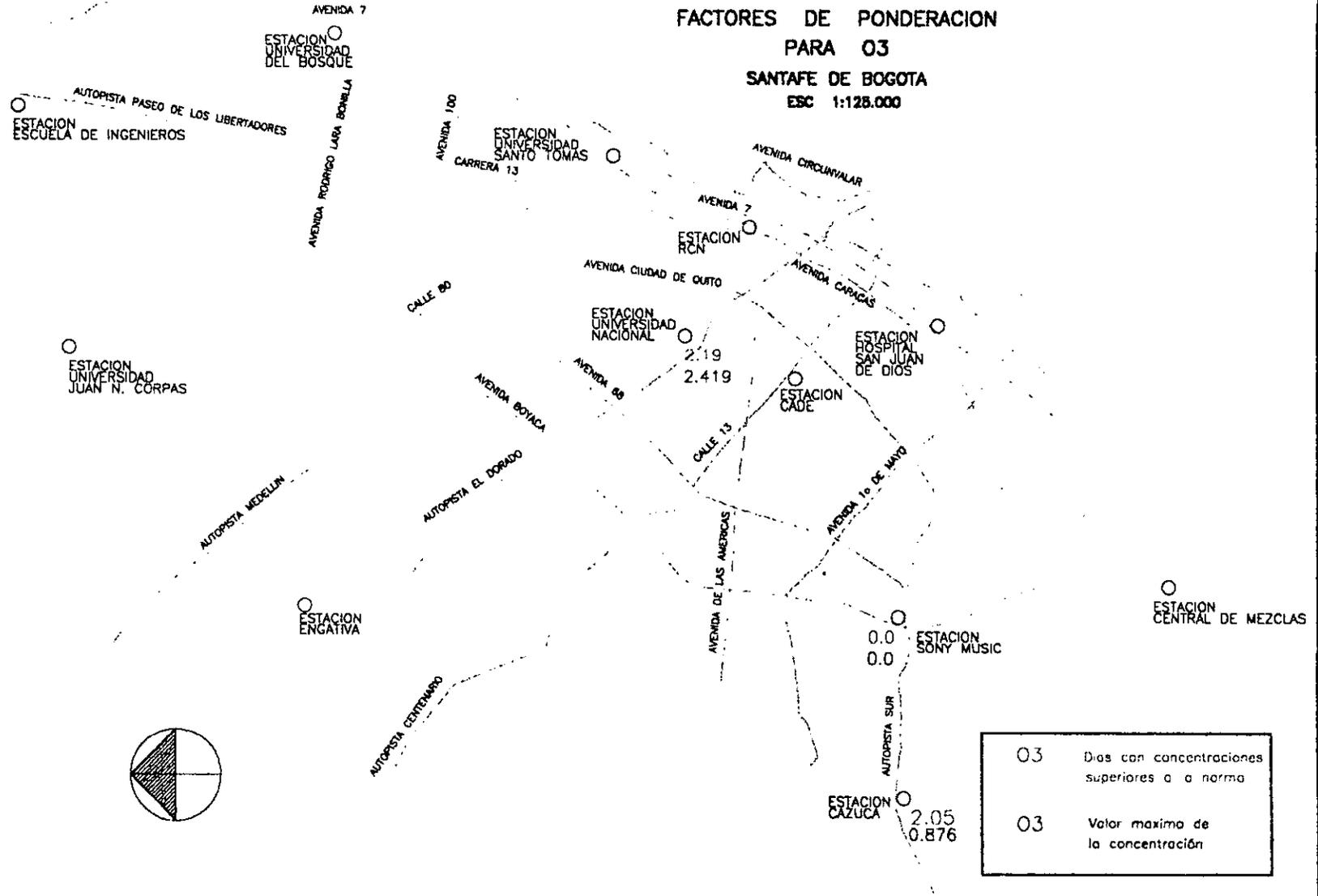


FIGURA 38  
 FACTORES DE PONDERACION  
 PARA SO2  
 SANTAFE DE BOGOTA  
 ESC 1:125.000

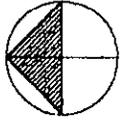


SO2	Días con concentraciones superiores a la norma
SO2	Valor máximo de la concentración

FIGURA 39  
 FACTORES DE PONDERACION  
 PARA 03  
 SANTA FE DE BOGOTA  
 ESC 1:125.000



03	Dias con concentraciones superiores a a norma
03	Valor maximo de la concentraci3n



El NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y el CO tienen factor cero como consecuencia de presentar valores siempre por debajo de la norma. En las figuras 35 a 39 se presentan los factores en las estaciones respectivas. Estos resultados pueden no ser aplicables en otras épocas del año.

Tabla 16. Factores de ponderación de acuerdo con el número de eventos sobre la norma

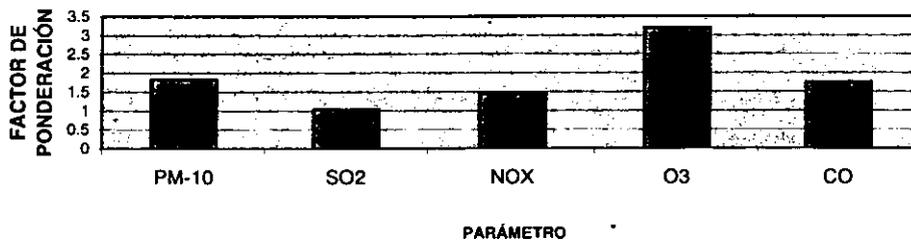
Estación	Parámetro				
	PM-10	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	CO
Bosque	ND	0	0	ND	ND
Corpas	0	0	0	ND	0
Engativá	0	0	0	ND	ND
Santo Tomás	0.144	0	0	ND	ND
Universidad Nal.	ND	0	0	2.19	ND
CADE	0.191	0	0	ND	ND
RCN	0	ND	ND	ND	0
S: Juan Dios	0.567	ND	ND	ND	0
Sony	0.475	0	0	0	0
Cazucá	3.14	0	0	2.05	0
Factor por parámetro	0.564625	0	0	1.413	0

En la tabla 17 se presentan los factores de ponderación considerando el valor máximo absoluto del promedio obtenido para el período de análisis correspondiente a cada parámetro, reportado en cada estación durante los tres meses de análisis. Los valores máximos utilizados para el cálculo de los factores, se presentan en la tabla 18.

Tabla 17. Factores de ponderación de acuerdo con el valor máximo absoluto

Estación	Parámetro				
	PM-10	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	CO
Bosque	ND	0	2.14	ND	ND
Corpas	0.435	0.81	0.14	ND	0
Engativá	0	0	0	ND	ND
Santo Tomás	1.77	0.49	0	ND	ND
Universidad Nal.	ND	0.211	1.84	2.419	ND
CADE	1.27	2.46	2.64	ND	ND
RCN	0	ND	ND	ND	1.93
S: Juan Dios	1.81	ND	ND	ND	2.03
Sony	1.47	2.57	2.17	0	3.1
Cazucá	3.35	1.69	2.65	2.876	1.66
Factor por parámetro	1.263125	1.028875	1.4475	1.765	1.744

**FACTORES DE PONDERACIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN LA CIUDAD**  
**FIGURA 40**



**FACTORES DE PONDERACIÓN POR ZONA DE LA CIUDAD**  
**FIGURA 41**

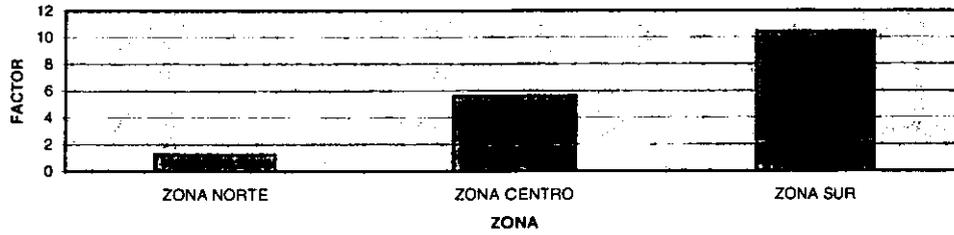


Tabla 18. Valores máximos reportados para todos los parámetros durante el período de muestreo

Parámetro	Promedio de tiempo	Estaciones									
		Cazucá	Sony	S. Juan Dios	RCN	CADE	Universidad Nacional	Sto Tomás	Bosque	Corpas	Engativá
PM-10	24 h	184	128	138	84	122	---	137	---	97	---
SO <sub>2</sub>	24 Hr	64	89	---	---	86	22	30	16	39	16
CO	8 hr	8.6	9.51	7.35	7.15	---	---	---	---	3.26	---
O <sub>3</sub>	1 hr	174	153	---	---	---	211	---	---	---	---
NO <sub>2</sub>	1 hr	174	163	---	---	192	142	---	161	36	27

Nota: valores en rojo, no cumplen con la norma

El parámetro que tiene mayor peso por el valor máximo absoluto es el O<sub>3</sub> seguido por el CO y el NO<sub>2</sub>.

El factor de ponderación por contaminante es el resultado de la suma de los factores de ponderación calculados de manera parcial, considerando eventos sobre los valores de referencia y valores máximos encontrados para el período de análisis. El factor de ponderación por zona es el resultado de la suma de los factores de ponderación por contaminantes en las estaciones de cada una. Estos factores tienen la limitación de que no todas las estaciones tienen evaluados los mismos parámetros.

En las figuras 40 y 41 se observan los resultados obtenidos del cálculo de factores de ponderación. Como se observa el parámetro de mayor peso es el ozono mientras que el de menos es el bióxido de azufre. La zona de mayor peso dentro de la ciudad es el sur, seguida por el centro y por último el norte. Este último resultado no incluye el ozono, ya que para el área norte, en ninguna estación se evaluó este parámetro.

### 3.6 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN PARA SANTA FÉ DE BOGOTÁ

El índice que se propone pretende mostrar la variación diaria y horaria de los niveles de contaminación en la ciudad. Se calculará de manera independiente para cada uno de los contaminantes, por lo que no será un índice combinado.

Esta propuesta se basa en el criterio de utilizar las normas, como punto de comparación de la toxicidad relativa de los contaminantes. Esto implica que el índice tendrá bases científicas, mas no más allá, de aquellas sobre las cuales se han establecido las normas y los episodios criterio.

Con el fin de incluir los principales contaminantes del aire, se utilizará la normatividad colombiana para CO (8 hr), SO<sub>2</sub> (24 hr) y O<sub>3</sub> (1 hr) y se adoptarán otras normas: para las partículas menores de 10 micrómetros, PM-10 (24 hr), se acogerá la norma (NAAQS) utilizada por la EPA, y para el NO<sub>2</sub> (1 hr), se adoptará la norma mexicana.

Para calcular el índice se utilizarán relaciones lineales con dos segmentos, establecidas de manera específica para cada uno de los parámetros considerados. El punto de quiebre será la norma de calidad. En la tabla 19 se detallan los algoritmos propuestos y la correspondencia con las concentraciones utilizadas como puntos de referencia. Para utilizar estos algoritmos las concentraciones de los contaminantes se deberán expresar así: SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en ppb, CO en ppm y PM-10 en µg/m<sup>3</sup>. El índice puede alcanzar un valor máximo de 5 y desciende según desmejora la calidad del aire. Comprenderá 5 rangos tal como se muestra en la tabla 20. El primero se ubica entre el nivel 5 y el 4.5. En éste, las concentraciones están por debajo de la mitad de la norma y la calidad del aire se considera Buena. El siguiente rango se ha establecido entre el 4.5 y el 4, éste último corresponde a la norma. En este rango la calidad del aire se califica como Moderada.

El nivel 4 es el punto de quiebre de los dos segmentos lineales definidos para cada contaminante. Se definió una segunda relación lineal con base en el nivel 4, correspondiente a la norma de calidad y el nivel 2 correspondiente a las concentraciones utilizadas por la EPA para definir el nivel de Peligro, valor de PSI por encima de 300 (EPA, 1998), para los parámetros CO, PM-10 y O<sub>3</sub>, y a las utilizadas en el IMECA para el nivel de calidad Muy Mala, valores mayores a 300 (Quadri, 1992), en los casos del NO<sub>2</sub> y el SO<sub>2</sub>.

TABLA 19. DETERMINACIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE PARA SANTA FE DE BOGOTÁ

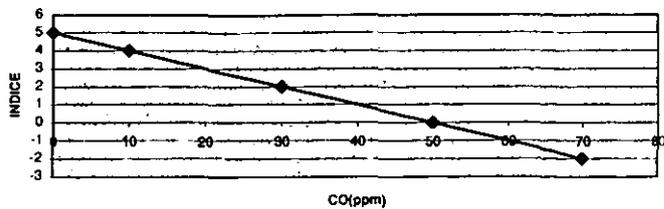
CONTAMINANTE	PARÁMETRO Y PERÍODO DE LA MUESTRA	INTERVALO DE CONCENTRACIÓN	FUNCIÓN
CO	VALOR MÁXIMO EN INTERVALOS DE 8 HORAS	0 a 13.1 ppm 13.1 a 30 ppm	$d = -0.0763x(CO) + 5$ $d = -0.0763x(CO) + 6$
SO2	VALOR PROMEDIO DE 24 HORAS	0 a 152.8 ppb 152.8 a 1000ppb	$d = -0.0065445x(SO2) + 5$ $d = -0.0023607x(SO2) + 4.36$
PM-10	PROMEDIO DE 24 HORAS	0 a 115 ug/m3 115.1 a 500	$d = -0.008695x(PM-10) + 5$ $d = -0.005195x(PM-10) + 4.597403$
NO2	VALOR MÁXIMO DE UNA HORA	0 a 0.210 ppb 210 a 2000 ppb	$d = -0.0048x(NO2) + 5$ $d = -0.0011x(NO2) + 4.2346$
O3	VALOR MÁXIMO DE UNA HORA	0 a 86.6 ppb 86.6 a 400 ppb	$d = -0.0115x(O3) + 5$ $d = -0.00638x(O3) + 4.5526$

73

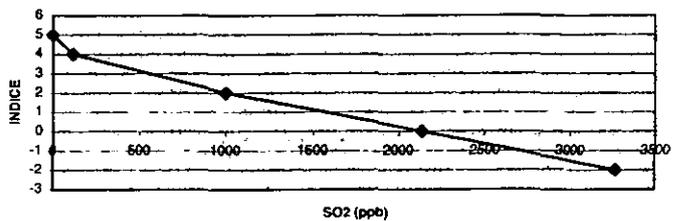
TABLA 20. INDICE DE CALIDAD DEL AIRE PARA SANTA FE DE BOGOTÁ

RANGO	CALIDAD	PARÁMETRO				
		CO	SO2	PM-10	NO2	O3
Entre 5 y 4.5	BUENA	8 hr, ppm 0 a 6.55	24 hr, ppb 0 a 76.4	24 hr, mg/m3 0 A 57	1 hr, ppb 0 a 105	1 hr, ppb 0 a 43.3
Entre 4.5 y 4	MODERADA	6.56 a 13.1	76.5 a 152.8	58 a 115	106 a 210	43.4 a 86.6
Entre 4 y 3	NOCIVA	13.2 a 20	152.9 a 576.4	115.1 a 307.5	211 a 1105	86.7 a 243.3
Entre 3 y 2	MUY NOCIVA	20.1 a 30	576.5 a 1000	307.6 a 500	1106 a 2000	243.4 a 400
Menor a 2	PELIGROSA	mayor a 30.1	mayor a 1000.1	mayor a 500.1	mayor a 2000.1	mayor a 400.1

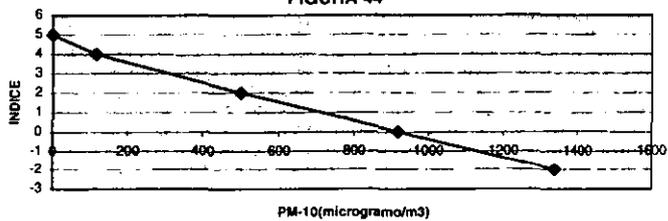
ÍNDICE DE CALIDAD POR CO  
FIGURA 42



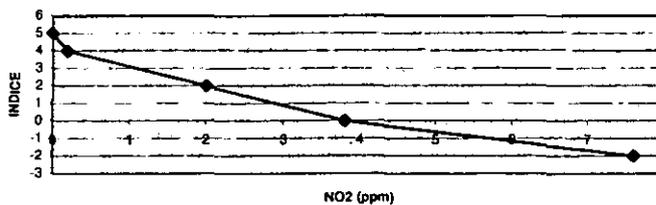
ÍNDICE DE CALIDAD POR SO2  
FIGURA 43



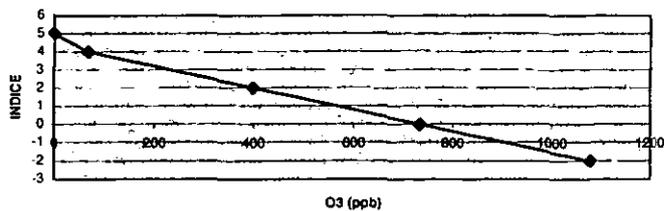
ÍNDICE DE CALIDAD POR PM-10  
FIGURA 44



ÍNDICE POR NO2  
FIGURA 45



ÍNDICE DE CALIDAD POR O3  
FIGURA 46



Dos rangos se han definido entre los valores de 4 y 2, dividiendo la diferencia de las concentraciones correspondientes al índice 4 y al 2 en partes iguales. Entre 4 y 3 la calidad del aire se define como Nociva y entre el 3 y el 2 se define como Muy Nociva. A concentraciones mayores que corresponden a valores del índice por debajo de 2, la calidad del aire se considera Peligrosa.

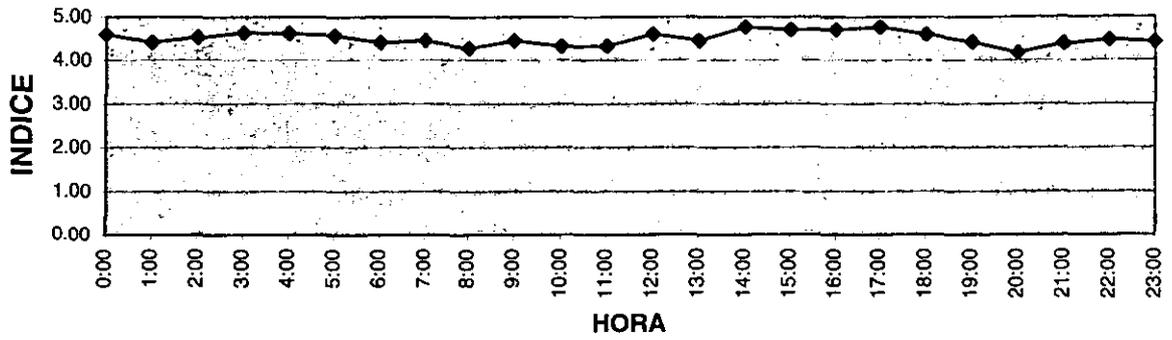
El índice reportará del modo mínimo, a través del menor valor obtenido, e independientemente para cada contaminante. Para un día cualquiera, el índice será igual al mínimo observado en las estaciones de monitoreo, aclarando de qué parámetro se trata. Para que sea espacialmente significativo, se calculará para cada una de las tres zonas en que se ha dividido la ciudad. Habrá un reporte para la zona sur, otro para la zona central, y otro para la zona norte. En el caso de que más de un parámetro, traducido en términos de índice, sea inferior a 4, lo que indica que se supera la norma, éstos se reportarán por separado y se especificará de qué contaminantes se trata. En las gráficas 42 a 46 se observan las relaciones entre concentración e índice.

A medida que la red de monitoreo aumente en sus estaciones o en los parámetros que analiza, la información adicional puede incluirse en este índice. Si se trata de un nuevo parámetro, se definirá una función con los mismos criterios con los que se definieron las correspondientes a este trabajo.

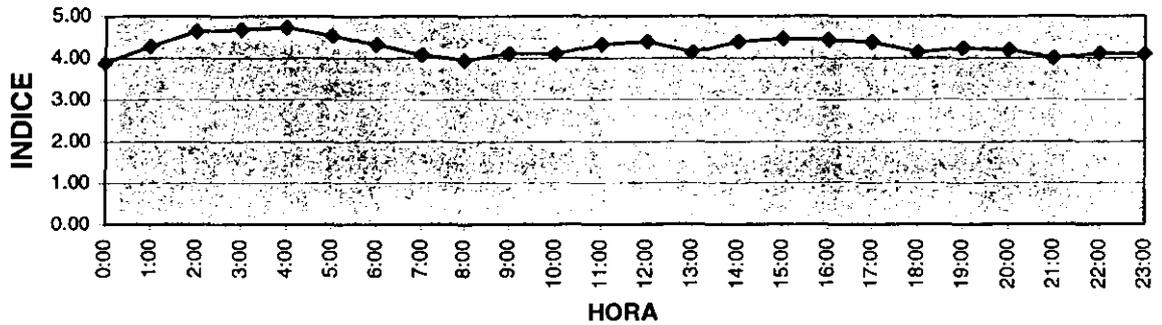
Como se deriva de todo lo anterior, este índice acoge la estructura del PSI aunque para nombrarlo según la nomenclatura establecida por Ott-Thom, es necesario hacer una consideración adicional:

De los cuatro caracteres que se incluyen en el código, el primero, número de contaminantes, es 5. El segundo carácter, que refleja el modo de cálculo corresponde a B, ya que utiliza funciones lineales segmentadas. El tercer carácter que se refiere a cómo reporta el índice, tiene establecidas tres categorías: 1 para aquellos índices que reportan todos los contaminantes separadamente, 2 para aquellos que reportan de modo máximo y 3 para índices agregados. En este caso se reporta del modo mínimo por lo que se agregará una categoría 4 para "otros". Sobre el cuarto carácter, relacionado con las categorías descriptivas, este índice se ubicaría en la categoría C, ya que no solamente adopta normatividad colombiana, sino que para hacer posible el cálculo del índice se deben adoptar arbitrariamente normas y criterios de episodio establecidos por otros países. En conclusión será un índice 5B4C.

**FIGURA 47**  
**VALOR HORARIO DEL ÍNDICE PARA LA ZONA NORTE, NOVIEMBRE 15/97**



**FIGURA 48**  
**VALOR HORARIO DEL ÍNDICE PARA LA ZONA CENTRO, NOVIEMBRE 15/97**



**FIGURA 49**  
**VALOR HORARIO DEL ÍNDICE PARA LA ZONA SUR, NOVIEMBRE 15-97**

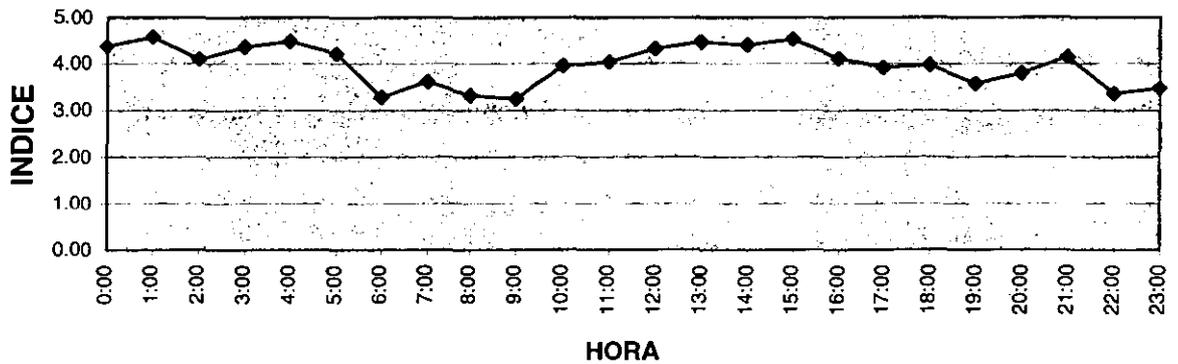


FIGURA 50  
VALOR HORARIO DEL ÍNDICE PARA LA ZONA NORTE, DICIEMBRE 13/97

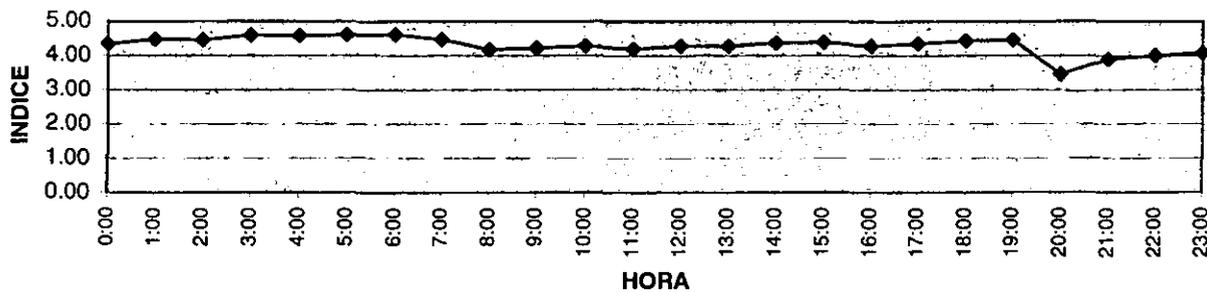


FIGURA 51  
VALOR HORARIO DEL ÍNDICE ZONA CENTRO, DICIEMBRE 13/97

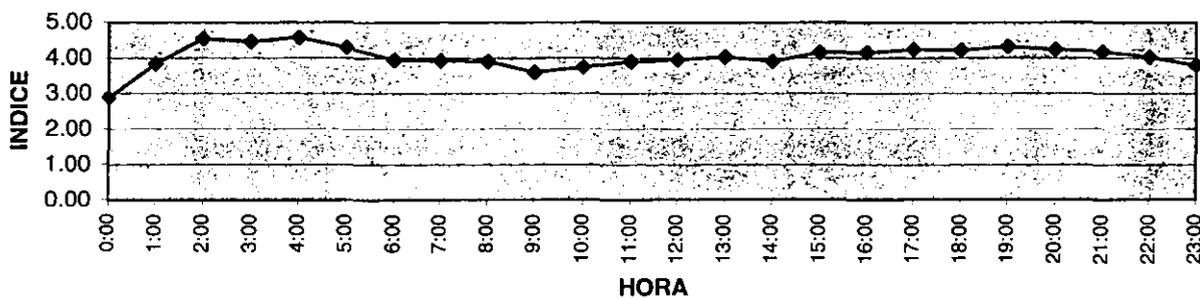
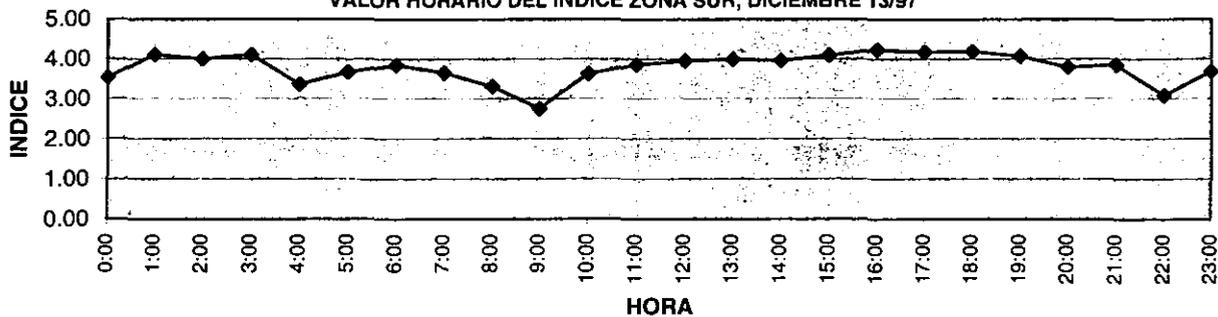


FIGURA 52  
VALOR HORARIO DEL ÍNDICE ZONA SUR, DICIEMBRE 13/97



### 3.7 APLICACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DEL AIRE

Para observar cómo funciona el índice de calidad del aire, se hizo una aplicación a los datos registrados por la red de la ciudad de Santa Fe de Bogotá, en dos días escogidos al azar, el 15 de noviembre y el 13 de diciembre 1997. Se realizó el cálculo para las distintas zonas de la ciudad de manera independiente. Para cada zona se calculó el valor del índice para cada uno de los parámetros para cada hora del día en cada una de las estaciones, de manera que se obtuvo la variación horaria del índice por parámetro y por estación. Luego se halló valor mínimo de cada hora, entre estaciones, con lo que se pudo analizar el comportamiento horario del índice por parámetro para determinada zona. Luego se encontró el valor mínimo del día, y ese es el valor reportado. Si más de un parámetro excedió la norma, cada uno fue reportado de manera separada. De los resultados obtenidos para los índices correspondientes al día 15 de noviembre, en la zona norte se reporta un índice de 4.17, por PM-10 a las 20 horas en la estación Corpas, lo que indica que ninguno de los parámetros evaluados superó la norma y la calidad del aire corresponde al rango "Moderada". En el anexo 7 se presenta la información utilizada y el cálculo del índice.

En la zona centro se observó un índice de 3.88 por PM-10 a las 0 horas en la estación Santo Tomás. Además, el O<sub>3</sub> también excedió la norma a las 9 horas, situación observada en la Universidad Nacional y que corresponde a un índice de 3.90. Por lo anterior, la calidad del aire para la zona Centro se reporta dentro del rango correspondiente a "Nociva". (Ver anexo 8).

La situación observada en la zona sur evidencia que los parámetros PM-10 y O<sub>3</sub>, excedieron las normas. El reporte es el siguiente: índice de 3.25 por PM-10 a las 9 horas en la estación Cazucá. Índice 3.90 por O<sub>3</sub> a las 9 horas en la estación Sony. Nivel de calidad del aire "Nociva". La información se detalla en el anexo 9.

Con relación a la situación presentada el día sábado 13 de diciembre se obtuvo para la zona norte un índice de 3.45 por PM-10 a las 20 horas, observado en la estación Corpas, que corresponde a calidad del aire "Nociva". La información específica se presenta en el Anexo 10.

El índice de la zona centro fue de 2.87 por PM-10 a las 0 horas, observado en la estación CADE. Fue necesario incluir en el reporte el índice correspondiente al O<sub>3</sub>, 3.74, presentado a las 10 horas en la Universidad Nacional, así como del correspondiente al SO<sub>2</sub>, de 3.94 a las 6 horas, en la estación CADE. La calidad del aire se reporta como "Muy Nociva" por PM-10. Anexo 11.

La zona sur presentó un índice de 2.76 por PM-10 a las 9 horas en la estación Cazucá. Por O<sub>3</sub>, el índice fue de 3.8 a las 10 horas, estación Sony, y por CO el índice fue de 3.8 observado a las 20 horas en la misma estación. La calidad del aire corresponde al rango "Muy Nociva", por PM-10. Anexo 12.

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Con la información disponible en la ciudad de Santa Fe de Bogotá sobre emisiones a la atmósfera no se puede conocer el aporte real de contaminantes por fuentes fijas y móviles.
2. Las condiciones meteorológicas en los meses de octubre, noviembre y diciembre de 1997 frente a las condiciones medias para esos meses del año mostraron mayor temperatura, menor humedad relativa y precipitación.
3. La velocidad del viento observada en el período de análisis se considera baja, por debajo de 1 m/s en altos intervalos de tiempo. A pesar de que la dirección del viento presenta gran variabilidad, las direcciones predominantes en la ciudad son sur y sureste. Con un período de análisis de tres meses no se puede concluir sobre la situación que se presenta en otras épocas del año.
4. Para el período analizado, el ozono es el parámetro de mayor importancia tanto con relación a los eventos en que fue superada la norma, como con relación a los valores máximos observados; sin embargo este resultado se obtuvo con solo tres meses de datos por lo que no se conoce la situación de otras épocas del año. Las concentraciones más altas de  $\text{SO}_2$  y de  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{NO}_x$  se presentan en zonas industriales. Los niveles de  $\text{CO}$  son comparativamente más altos en zonas de alto tráfico vehicular.
5. La normatividad colombiana no incluye todos los contaminantes medidos por la red de monitoreo de aire del DAMA. Además, los intervalos que considera no permiten en todos los casos la evaluación del parámetro en el corto plazo. Por razón fue necesario utilizar normatividad de otros países.
6. La zona de la ciudad que presenta mayor contaminación es el sur, seguido por el centro y por último el norte. Si bien este resultado está de acuerdo con la dinámica de la ciudad, no tuvo en cuenta el ozono por no estar incluido en ninguna de las estaciones del norte. Este resultado se obtuvo con sólo tres meses de datos y no se conoce la situación de otras épocas del año.
7. El parámetro con mayor peso es el  $\text{O}_3$ , seguido por  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{CO}$ .
8. La normatividad colombiana es insuficiente como base para proponer un índice de calidad del aire. La ciudad no cuenta con estudios de salud específicos. Por lo anterior fue necesario utilizar normas de calidad de aire de otros países.
9. Las ventajas del índice de calidad del aire propuesto son la capacidad de indicar de manera independiente el o los contaminantes cuyas concentraciones hayan excedido la normatividad y la capacidad de incluir la evaluación de otros contaminantes y otras estaciones.

10. Las limitaciones del índice de calidad del aire propuesto se deben a que no contempla el efecto de combinación de contaminantes. Además, por basarse en la normatividad no contempla efecto sobre plantas, animales y materiales. Por otra parte se enfoca únicamente a efectos agudos en períodos menores de 24 horas.
11. Se recomienda extender la evaluación del ozono a otras estaciones, ya que es el parámetro mas crítico.
12. Para el diseño de un índice de calidad del aire definitivo se requiere que la ciudad cuente con estudios de salud y una normatividad que incluya todos los parámetros de interés.
13. Para estudios posteriores, de mayor alcance, es necesario que la ciudad cuente con información suficiente y actualizada sobre la industria y su aporte a la contaminación atmosférica.
14. Para un estudio de mayor alcance es necesario contar con datos meteorológicos de capas altas y con registros de datos de varios años de los que, en la actualidad, no se dispone.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPON. Estudio del plan para el control de la polución del aire en el área de la ciudad de Santafé de Bogotá. Informe Final. Vol. 4. Bogotá: JICA.1991
2. ALCALDÍA MAYOR DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ, D. C.. Valoración del impacto ambiental de la gran industria manufacturera del Distrito Capital. Santa Fe de Bogotá: La alcaldía . 1997
3. BOCAREJO, Juan Pablo. Principales características del parque automotor en Colombia. En: CURSO SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR AUTOMOTORES. . (1996:Bogotá) Memorias del Curso seminario internacional sobre control de la contaminación por automotores. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1996
4. CANTER Larry, Environmental Impact Assessment, Editorial Mcgraw-Hill Inc., Segunda Edición, 1996
5. COLOMBIA. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Diccionario geográfico de Colombia. Santafé de Bogotá, El Instituto.1997
6. COLOMBIA. MINISTERIO DE SALUD. DECRETO 02 de 1982. Normas de emisiones atmosféricas y calidad del aire. Bogotá:El Ministerio, 1982
7. EMPRESA COLOMBIANA DE PETROLEOS, ECOPETROL. COMBUSTIBLES Alternos: Uso del GLP automotor. En: CURSO SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR AUTOMOTORES. . (1996:Bogotá) Memorias del Curso seminario internacional sobre control de la contaminación por automotores. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1996
8. ESPAÑA. Fuentes Autonómicas. El nuevo índice de calidad de la Generalitat respeta la normativa de la UE.
9. ESPITIA, Alfonso. Taller II de ingeniería ambiental. 1ª edición. Universidad Autónoma Metropolitana, 1991.
10. FUENTES, Vicente y GARCÍA, Alfonso. Evaluación de la calidad del aire del Valle de México. Informe Final. México D.F., División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería , UNAM. 1989
11. GARCÍA REYNOSO, José Agustín. Evaluación preliminar del impacto de una fuente en los niveles de ozono de la ciudad de México. México D.F..1997. Tesis (Maestro en Ingeniería (Ambiental)). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado

12. JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY. The study on air pollution control plan in Bogotá City area. Draft final report. Bogotá: JICA. 1991
13. \_\_\_\_\_ . \_\_\_\_\_ . Inception report. Bogotá: JICA. 1991
14. \_\_\_\_\_ . \_\_\_\_\_ . Interim report. Bogotá: JICA. 1991
15. \_\_\_\_\_ . The study of the master plan urban transport of Santafé de Bogotá in Republic of Colombia. Bogotá: JICA, 1996
16. MÉXICO. SISTEMA DE INFORMACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE. Ciudad de México red de monitoreo atmosférico. SIMA, 1997. [www.sima.com.mx/sima/df/contamin.html](http://www.sima.com.mx/sima/df/contamin.html)
17. MÉXICO. SUBSECRETARÍA DE MEJORAMIENTO DEL AMBIENTE. El índice mexicano de calidad del aire (IMEXCA). La Subsecretaría.
18. MEXICO-ESTADOS UNIDOS. INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO-LABORATORIO NACIONAL DE LOS ALAMOS. Estudio global de la calidad del aire en la ciudad de México. Informe final. Vol 1. Resumen Ejecutivo.
19. MEXICO-USA. INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO-LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY. Mexico city air quality research initiative. Vol 5. Estrategic evaluation. IMP-Los Alamos National Laboratory, 1994.
20. \_\_\_\_\_ . \_\_\_\_\_ . Vol 2. Problem definition, background, and summary of prior research.
21. OTT, Wayne and THOM Gary. A critical review of air pollution index systems in de United States and Canada. Journal of the Air Pollution Control Association. Vol. 26, No 5. 1976
22. OTT, Wayne. Environment statistics and data analysis. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995
23. PEAVY, Howard; ROWE, Donald and TCHOBANOGLIOUS, George. Environmental Engineering. McGraw-Hill International Editions. 1985
24. PROMIGAS S. A. E. S. P.. Gas natural para vehículos. Desarrollo y proyecciones en Colombia. En: CURSO SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR AUTOMOTORES. . (1996:Bogotá) Memorias del Curso seminario internacional sobre control de la contaminación por automotores. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1996
25. QUADRI, Gabriel y SÁNCHEZ, Luis Rubén. La ciudad de México y la contaminación atmosférica. México D. F: editorial Limusa. 1992
26. RINCON, José M; ROMERO Germán y MONTENEGRO Enrique. Uso de gasolinas reformuladas en las condiciones de Santafé de Bogotá. En: CURSO SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR AUTOMOTORES. (1996:Bogotá) Memorias del Curso seminario internacional sobre control de la contaminación por automotores. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1996
27. SANCHEZ Ernesto, URIBE Eduardo, Contaminación Industrial en Colombia. Editorial Tercer Mundo Editores, Primera Edición, 1994
28. SANTA FÉ DE BOGOTÁ. DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE PLANEACIÓN DISTRITAL. Estadísticas Santa Fé de Bogotá: DAPD. 1998

29. SANTA FÉ DE BOGOTÁ. DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO MEDIO AMBIENTE. Resolución 160 de 1996. Por el cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por las fuente móviles con motor a gasolina y diesel . Bogotá: DAMA, 1996
30. STRAUSS W., MAINWARING S.J., Contaminación del Aire : Causas, Efectos y Soluciones. Editorial Trillas, Segunda reimpresión en Español, 1995
31. THOM, Gary and OTT, Wayne. A proposed uniform air pollution index. Atmospheric Environment. Vol. 10. 1976. P 261 – 264
32. URIBE Eduardo. Contaminación del aire generado por fuentes móviles en Santafé de Bogotá. En: CURSO SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR AUTOMOTORES. . (1996:Bogotá) Memorias del Curso seminario internacional sobre control de la contaminación por automotores. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1996
33. US EPA OFFICE OF AIR & RADIATION. 1995 National air quality: status and trends. EPA, 1996. [www.epa.gov/oar/aqtrnd95/no2.html](http://www.epa.gov/oar/aqtrnd95/no2.html)
34. USA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. National ambient air quality standards (NAAQS). EPA. [www.epa.gov/oar/airs/criteria.html](http://www.epa.gov/oar/airs/criteria.html)
35. USA. OFFICE OF AIR QUALITY PLANNING AND STANDARDS. Ambient air monitoring. OAQPS,1996.
36. \_\_\_\_\_. Air pollution monitoring. OAQPS,1997. [www.epa.gov/oar/oaqps/qa/monprog.html](http://www.epa.gov/oar/oaqps/qa/monprog.html)
37. USA. OFFICE OF AIR QUALITY PLANNING AND STANDARDS. Measuring air quality. EPA 541/K-94-001, 1998
38. WARK K., WARNER C., Contaminación del Aire : Origen y Control. Editorial Limusa, 1997

## ANEXOS

**ANEXO 1. NORMATIVIDAD NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE PARA ESTADOS UNIDOS**

CONTAMINANTE E INTERVALO DE TIEMPO	NORMA	
	Primaria	Secundaria
<b>Ozono (O3)</b> Promedio de 1 hora	0.12 ppm	0.12 ppm
<b>Monóxido de carbono (CO)</b> Promedio de 8 horas Promedio de 1 hora	9 ppm 35 ppm	
<b>Partículas menores de 10 µm (PM10)</b> Media aritmética anual Promedio de 24 horas	50 µg/m3 150 µg/m3	50 µg/m3 150 µg/m3
<b>Partículas menores de 2.5 µm (PM2.5)</b> Media aritmética anual Promedio de 24 horas	15 µg/m3 65 µg/m3	50 µg/m3 150 µg/m3
<b>Dióxido de Nitrógeno (NO2)</b> Media aritmética anual	0.053 ppm	0.053 ppm
<b>Plomo (Pb)</b> Promedio para tres meses	1.5 µg/m3	1.5 µg/m3
<b>Dióxido de azufre (SO2)</b> Media aritmética anual Promedio de 24 horas Promedio de 3 horas	0.03 ppm 0.14 ppm	0.5 ppm

Fuente: EPA, National Ambient Air Quality Standards, NAAQS, 1997

## ANEXO 2. CONCENTRACION Y CRITERIOS DE LA ESCALA PSÍ

RANGO	CALIDAD DEL AIRE	PARÁMETRO Y TIEMPO DE LA MUESTRA				
		O3 (ppm) 1 h	CO (ppm) 8 h	PM10 (µg/m3) 24 h	SO2 (ppm)* 24 h	NO2 (ppm)* 1 hr
0 - 50	Buena	0.0 - 0.06	0.00 - 4.5	0 - 50	0.0 a 0.6	
51 - 100	Moderada	0.07 - 0.12	4.6 - 9.0	51 - 150	0.07 - 0.13	
101 - 199	Nocivo	0.13 - 0.19	9.1 - 14.9	151 - 349	0.14 - 0.29	
200 - 299	Muy nocivo	0.20 - 0.39	15.0 - 29.9	350 - 419	0.3 - 0.59	0.6 - 1.1
desde 300	Peligrosa	desde 0.40	desde 30	420 - 499	desde 0.6	desde 1.2

Fuente: Environmental Protection Agency, 1976

\* Ott-Thom, propuesta, 1975

### ANEXO 3. CONCENTRACION Y CRITERIOS DE LA ESCALA IMECA

RANGO	CALIDAD DEL AIRE	PARÁMETRO Y TIEMPO DE LA MUESTRA					
		PST( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 24 h	PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 24 h	SO2 (ppm) 24 h	NO2 (ppm) 1 h	CO (ppm) 8 h	O3 (ppm) 1 h
0 - 100	Satisfactoria	275	150	0.13	0.21	13	0.11
101 - 200	No satisfactoria	546	350	0.35	0.66	22	0.23
201 - 300	Mala	637	420	0.56	1.1	31	0.35
301 - 500	Muy mala	1000	600	1	2	50	0.6

Fuente:Quadri, Sánchez, 1992

#### ANEXO 4. MÉTODO PARA EL CÁLCULO DEL IMECA

CONTAMINANTE	INTERVALO DE TIEMPO Y DETERMINACION DE VALORES MAXIMOS DEL IMECA	INTERVALO DE CONCENTRACION	ECUACIONES
Partículas (PST)	Promedio de 24 horas, evaluado de las 19:00 a las 18:00 del día siguiente	0 - 275 µg/m <sup>3</sup> 275 - 1000 µg/m <sup>3</sup>	IMECA=0.36363636*C(PST) IMECA=0.55172413*C(PST) - 51.72413
PM-10	Promedio de 24 horas, evaluado de las 19:00 a las 18:00 del día siguiente	0 - 50 µg/m <sup>3</sup> 51 - 350 µg/m <sup>3</sup> 351 - 420 µg/m <sup>3</sup> 421 - 500 µg/m <sup>3</sup> 501 - 600 µg/m <sup>3</sup>	IMECA=(PM10) IMECA=(PM10)X0.5 + 25 IMECA=(PM10)X(10/7) - 300 IMECA=(PM10)X(5/4) - 225 IMECA=(PM10) - 100
SO <sub>2</sub>	Promedio de 24 horas, evaluado de las 19:00 a las 18:00 del día siguiente	0 - 0.13 ppm 0.13 ppm - 1 ppm	IMECA=769.230769*C(SO <sub>2</sub> ) IMECA=459.770114*C(SO <sub>2</sub> )+40.22989
CO	Máximo de los tres promedio diario de ocho horas evaluados de 19:00 a 2:00, de 3:00 a 10:00, y de 10:00 a 18:00	0 - 13 ppm 13 - 50 ppm	IMECA=7.69230768*C(CO) IMECA=10.8108108*C(CO)-40.5405
NO <sub>2</sub>	Máximo promedio de una hora evaluado entre las 19:00 y las 18:00 del día siguiente	0 - 0.21 ppm 0.21 - 2 ppm	IMECA=476.190476*C(NO <sub>2</sub> ) IMECA=223.463687*C(NO <sub>2</sub> )+53.07264
O <sub>3</sub>	Máximo promedio de una hora evaluado entre las 19:00 y las 18:00 del día siguiente	0 - 0.11 ppm 0.11 - 0.6 ppm	IMECA=909.090909*C(O <sub>3</sub> )+5 IMECA=816.326350*C(O <sub>3</sub> )+10.20409

Fuente: Instituto Mexicano del Petróleo, Laboratorio Nacional de Los Alamos, 1994

**ANEXO 5. NORMATIVIDAD MEXICANA APLICADA A LA DETERMINACION DEL IMECA**

CONTAMINANTE	EXPOSICIÓN AGUDA		EXPOSICIÓN CRÓNICA
	CONCENTRACION E INTERVALO DE TIEMPO	FRECUENCIA MAXIMA ACEPTABLE	
Ozono	0.11 ppm (1 hr)	Una vez cada 3 años	.03 ppm(media aritmética anual)
Bióxido de azufre	0.13 ppm (24 hr)	Una vez al año	
Monóxido de carbono	11 ppm (8 hr)	Una vez al año	1.5 µg/m3 (promedio aritmético en 3 meses)
Bióxido de nitrógeno	0.21 ppm (1 hr)	Una vez al año	
Plomo			
Partículas suspendidas totales	260 µg/m3	Una vez al año	
Partículas menores de 10 micrones	150 µg/m3	Una vez al año	

Fuente: Sistema Nacional de Información Ambiental, SIMA, 1998

## ANEXO 6

TABLA 1. PM-10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), DATOS PROMEDIO HORARIO UTILIZADOS, CALCULADOS CON BASE EN LOS DATOS REPORTADOS DURANTE LA TOTALIDAD DEL PERÍODO DE MUESTREO

HORA	ESTACIÓN								
	RCN	SONY	JUANDIOS	ENGATIVA	CAZUCÁ	STOMAS	CORPAS	CADE	BOSQUE
0	0.032	0.061	0.056	0.037	0.100	0.016	0.054	0.062	0.028
1	0.032	0.053	0.061	0.044	0.086	0.016	0.050	0.056	0.026
2	0.031	0.054	0.065	0.048	0.088	0.015	0.050	0.053	0.027
3	0.032	0.053	0.067	0.037	0.078	0.014	0.050	0.055	0.031
4	0.034	0.059	0.061	0.034	0.092	0.009	0.048	0.052	0.033
5	0.033	0.064	0.063	0.046	0.096	0.012	0.048	0.051	0.028
6	0.033	0.097	0.084	0.039	0.126	0.027	0.053	0.066	0.031
7	0.052	0.145	0.105	0.041	0.160	0.047	0.114	0.089	0.044
8	0.081	0.148	0.120	0.040	0.172	0.053	0.064	0.094	0.052
9	0.091	0.123	0.121	0.037	0.161	0.067	0.067	0.097	0.050
10	0.088	0.100	0.100	0.044	0.137	0.053	0.072	0.080	0.042
11	0.062	0.094	0.081	0.036	0.117	0.050	0.070	0.072	0.039
12	0.050	0.106	0.065	0.034	0.124	0.045	0.068	0.085	0.047
13	0.043	0.082	0.060	0.032	0.101	0.029	0.064	0.072	0.029
14	0.051	0.080	0.063	0.034	0.107	0.041	0.060	0.072	0.033
15	0.044	0.078	0.066	0.035	0.108	0.032	0.066	0.070	0.032
16	0.048	0.095	0.065	0.037	0.120	0.042	0.061	0.072	0.031
17	0.043	0.078	0.071	0.035	0.095	0.046	0.059	0.070	0.028
18	0.048	0.082	0.068	0.035	0.086	0.039	0.058	0.066	0.024
19	0.042	0.088	0.068	0.034	0.081	0.032	0.055	0.063	0.026
20	0.036	0.096	0.066	0.038	0.098	0.023	0.070	0.073	0.023
21	0.035	0.089	0.064	0.037	0.107	0.023	0.069	0.057	0.029
22	0.032	0.082	0.065	0.038	0.105	0.015	0.060	0.054	0.026
23	0.034	0.071	0.063	0.039	0.113	0.013	0.058	0.054	0.025

## ANEXO 6

**TABLA 2. CO (ppm), DATOS PROMEDIO HORARIO UTILIZADOS, CALCULADO CON BASE EN LOS DATOS REPORTADOS PARA TODO EL PERÍODO DE MUESTREO**

HORA	ESTACIÓN				
	SONY	SAN JUAN	CORPAS	RCN	CAZUCA
0.00	4.39	2.97	1.74	1.90	3.14
1.00	3.39	2.63	1.73	1.80	2.85
2.00	3.25	2.46	1.74	1.47	2.79
3.00	2.90	2.17	1.74	1.28	2.61
4.00	2.85	1.93	1.70	1.23	2.63
5.00	3.52	1.93	1.79	1.43	2.86
6.00	5.70	2.75	2.04	3.19	4.15
7.00	7.82	4.93	1.92	5.67	5.24
8.00	8.25	6.47	1.81	6.00	5.43
9.00	6.47	5.67	1.93	4.71	4.46
10.00	5.55	4.35	1.98	3.41	3.32
11.00	5.26	3.32	2.05	2.62	2.78
12.00	5.06	2.77	2.23	2.11	2.62
13.00	5.14	2.80	2.01	2.10	2.48
14.00	5.19	2.83	2.01	2.34	2.67
15.00	5.25	2.76	1.96	2.46	2.77
16.00	5.55	3.00	1.84	2.98	2.81
17.00	5.55	3.36	1.73	3.50	2.98
18.00	6.25	3.74	1.76	3.80	3.18
19.00	7.01	4.42	1.82	3.52	3.46
20.00	7.41	4.81	1.89	3.03	3.46
21.00	7.22	4.26	1.86	2.79	3.34
22.00	6.49	4.07	1.84	2.29	3.58
23.00	5.83	3.67	1.77	1.93	3.64

## ANEXO 6

TABLA 3.SO2 (ppb), DATOS PROMEDIO HORARIO UTILIZADOS, CALCULADOS CON BASE EN LOS DATOS REPORTADOS DURANTE LA TOTALIDAD DEL PERÍODO DE MUESTREO

HORA	ESTACIONES							CADE
	EL BOSQUE	SONY	U NAL	ENGATIVÁ	CAZUCA	STO TOMÁS		
0	7	23	14	7	24	11	38	
1	7	23	14	7	24	11	37	
2	7	21	13	6	25	11	38	
3	7	22	12	6	29	10	39	
4	7	26	12	7	28	11	43	
5	7	36	12	7	31	11	45	
6	10	43	19	8	35	15	58	
7	12	55	26	10	37	23	62	
8	11	51	22	9	28	23	50	
9	9	44	15	8	19	18	36	
10	7	40	10	6	15	13	28	
11	6	34	9	6	13	11	27	
12	6	32	9	5	11	11	27	
13	6	31	9	5	12	11	30	
14	6	35	10	5	13	12	31	
15	6	37	9	5	11	12	31	
16	7	36	10	5	11	12	32	
17	7	42	9	6	12	12	33	
18	6	40	10	6	13	13	38	
19	7	44	12	6	18	12	35	
20	7	41	12	6	18	11	35	
21	7	40	14	6	21	11	33	
22	7	31	14	6	25	11	33	
23	7	26	13	6	24	11	36	

## ANEXO 6

TABLA 4. NOX (ppm), DATOS PROMEDIO HORARIO UTILIZADOS, CALCULADOS CON BASE EN LOS DATOS REPORTADOS DURANTE LA TOTALIDAD DEL PERÍODO DE MUESTREO

HORA	ESTACIÓN							
	CADE	CORPAS	STO TOMÁS	CAZUCA	ENGATIVA	U NAL	SONY	EL BOSQUE
0	44	26	41	123	12	82	34	36
1	43	26	41	125	12	70	33	35
2	40	26	34	131	13	64	30	35
3	40	26	30	139	13	57	30	31
4	42	27	31	156	15	56	39	33
5	68	30	35	191	17	68	66	47
6	116	37	64	215	21	112	85	65
7	112	36	88	205	23	117	75	59
8	77	28	75	172	16	76	61	44
9	55	21	55	125	11	55	57	23
10	42	18	42	102	8	44	55	17
11	39	16	41	94	6	42	48	14
12	35	16	43	75	6	45	51	15
13	37	16	43	68	6	52	54	17
14	41	16	45	65	6	60	54	20
15	44	16	46	62	7	65	60	28
16	47	17	48	65	7	59	65	27
17	55	18	51	76	9	65	64	30
18	59	21	55	83	12	77	72	31
19	66	23	57	91	12	90	72	31
20	59	24	51	104	12	96	66	40
21	56	24	48	112	13	101	64	42
22	57	25	41	123	14	99	59	46
23	53	25	36	142	13	96	49	46

## ANEXO 6

TABLA 5. NO (ppm), DATOS PROMEDIO HORARIO UTILIZADOS, CALCULADOS CON BASE EN LOS DATOS REPORTADOS DURANTE LA TOTALIDAD DEL PERÍODO DE MUESTREO

HORA	ESTACIÓN							
	BOSQUE	SONY	U NAL	ENGATIVÁ	CAZUCÁ	STO TOMÁS	CORPAS	CADE
0:00	11.4	18.3	67.1	3.7	123.2	19.7	9.1	21.0
1:00	10.7	18.1	58.2	4.0	132.6	22.9	9.4	21.1
2:00	9.2	18.1	53.1	4.2	145.0	16.0	9.8	18.8
3:00	8.8	17.1	45.7	4.3	168.8	13.5	10.2	18.6
4:00	10.1	25.7	48.3	5.4	181.2	13.1	10.8	21.5
5:00	15.5	54.5	59.9	7.2	212.1	14.4	13.3	48.2
6:00	42.4	67.8	99.0	14.9	234.6	42.0	20.8	86.7
7:00	33.1	41.3	75.7	12.6	208.0	46.9	19.9	53.8
8:00	14.6	25.9	36.1	9.4	183.6	19.8	14.1	16.7
9:00	10.4	23.8	31.6	3.8	149.7	16.1	10.2	11.2
10:00	8.8	27.6	34.7	3.1	113.4	15.6	8.9	11.1
11:00	8.0	27.8	38.2	2.9	90.2	17.5	8.4	15.1
12:00	7.2	28.5	57.8	3.1	68.9	21.3	8.3	14.3
13:00	7.5	28.5	53.2	3.0	50.0	18.1	8.3	14.6
14:00	8.0	27.3	62.1	2.9	51.8	17.8	8.1	15.6
15:00	8.0	29.9	67.3	3.1	42.4	18.2	7.9	16.8
16:00	7.8	31.5	60.3	3.1	43.9	19.9	7.7	18.8
17:00	8.9	34.1	63.0	3.4	57.0	22.8	7.5	22.6
18:00	12.8	44.3	67.8	3.3	62.3	25.7	7.7	23.9
19:00	11.4	48.3	78.1	3.1	66.0	24.3	8.0	29.4
20:00	13.3	40.6	87.9	5.1	80.2	23.8	8.6	25.4
21:00	15.1	40.8	99.6	5.7	90.0	22.2	8.9	25.2
22:00	13.0	35.4	118.0	5.2	98.5	16.2	8.9	28.2
23:00	11.7	26.1	118.9	3.7	107.3	13.2	8.7	26.1











ANEXO 8. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE DE BOGOTÁ, ZONA CENTRO, NOVIEMBRE 15 DE 1997

TABLA 3. Índice por parámetro para la zona centro. Noviembre 15-97

Parámetro	VALOR DEL ÍNDICE HORARIO POR PARÁMETRO PARA LA ZONA CENTRO																							
	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
CO	4.82	4.79	4.89	4.90	4.90	4.89	4.76	4.72	4.71	4.69	4.71	4.81	4.80	4.79	4.78	4.76	4.76	4.78	4.81	4.79	4.79	4.73	4.77	4.77
SO2	4.77	4.74	4.67	4.75	4.76	4.55	4.60	4.55	4.73	4.79	4.69	4.77	4.54	4.67	4.82	4.86	4.86	4.88	4.89	4.87	4.85	4.80	4.80	4.81
PM-10	3.88	4.28	4.63	4.68	4.75	4.53	4.32	4.07	3.94	4.30	4.09	4.32	4.38	4.13	4.38	4.45	4.43	4.38	4.13	4.23	4.19	4.00	4.10	4.09
NO2	4.87	4.87	4.86	4.92	4.73	4.88	4.85	4.69	4.76	4.75	4.82	4.88	4.84	4.83	4.85	4.81	4.78	4.75	4.80	4.80	4.82	4.84	4.85	4.88
O3	4.94	4.93	4.89	4.86	4.94	4.85	4.93	4.84	4.41	4.10	4.33	4.56	4.72	4.80	4.79	4.83	4.85	4.90	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92

ANEXO 9. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE DE BOGOTÁ, ZONA SUR, NOVIEMBRE 15 DE 1997

TABLA 1. Información utilizada para el cálculo del índice correspondiente a la zona sur para noviembre 15/97

Parámetro	Estación	DATOS HORARIOS ARROJADOS POR LA RED DE MONITOREO																							
		00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
CO	San Juan de Dios	1.9	2.2	2.3	1.0	1.0	2.0	3.0	5.4	3.1	4.1	3.9	2.1	1.8	3.3	4.5	6.5	6.8	2.9	6.5	9.5	8.1	6.6	5.4	5.3
	SONY	1.8	2.7	2.1	1.4	1.9	7.9	4.9	9.5	4.8	2.7	1.6	1.1	4.5	3.7	2.4	6.5	10.9	8.3	10.4	5.2	3.1	3.6	8.3	5.4
	Caucá	1.6	2.0	2.8	2.1	2.6	5.0	5.8	6.1	5.3	3.6	2.7	2.2	1.6	1.8	1.5	2.4	2.1	3.8	6.5	4.6	2.9	3.7	5.2	4.2
SO2	San Juan de Dios																								
	SONY	5	14	7	4	5	71	51	68	42	22	17	9	17	16	14	29	36	33	36	33	16	22	30	20
	Caucá	7	8	12	15	9	18	47	58	33	17	12	10	7	8	5	8	8	12	24	26	13	23	58	48
PM-10	San Juan de Dios																								
	SONY	30	28	28	25	31	46	158	188	244	130	115	49	41	60	48	38	102	130	115	196	153	98	104	196
	Caucá	71	49	103	73	59	90	252	188	242	259	122	110	78	61	68	54	59	42	120	134	132	81	237	215
NO2	San Juan de Dios																								
	SONY	20	32	35	21	27	26	46	136	78	36	17	6	40	30	13	69	91	98	56	56	49	53	43	29
	Caucá	34	30	39	36	32	32	36	62	97	54	46	33	23	25	23	36	36	60	62	63	51	52	41	41
O3	Sony	16	10	10	13	10	11	6	25	65	102	68	37	22	24	28	12	13	12	9	7	6	5	9	6
	San Juan de Dios																								
	Caucá	11	11	3	3	8	9	5	13	70	65	36	25	24	26	24	19	17	10	5	7	2	4	3	4

ANEXO 9. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE DE BOGOTÁ, ZONA SUR, NOVIEMBRE 16 DE 1997

TABLA 2. Cálculo del índice horario por parámetro y por estación, zona sur, noviembre 15/97

Parámetro	Estación	ÍNDICE HORARIO PARA CADA ESTACIÓN Y PARA CADA PARÁMETRO																							
		00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
CO	San Juan de Dios	4.99	4.98	4.98	4.99	4.99	4.98	4.98	4.98	4.98	4.97	4.97	4.98	4.99	4.97	4.97	4.95	4.95	4.98	4.95	4.93	4.94	4.95	4.96	4.96
	SONY	4.98	4.98	4.98	4.98	4.99	4.94	4.96	4.93	4.99	4.98	4.99	4.99	4.97	4.97	4.98	4.94	4.92	4.94	4.92	4.96	4.98	4.97	4.94	4.96
	Cazucá	4.99	4.98	4.98	4.98	4.98	4.96	4.96	4.95	4.96	4.97	4.98	4.98	4.99	4.99	4.99	4.98	4.96	4.97	4.95	4.96	4.96	4.97	4.96	4.97
SO2	San Juan de Dios																								
	SONY	4.97	4.91	4.95	4.97	4.97	4.54	4.87	4.55	4.73	4.86	4.89	4.94	4.89	4.90	4.91	4.81	4.78	4.78	4.75	4.78	4.90	4.86	4.80	4.87
	Cazucá	4.95	4.96	4.92	4.90	4.94	4.90	4.69	4.62	4.78	4.89	4.92	4.93	4.95	4.96	4.97	4.95	4.95	4.92	4.84	4.83	4.91	4.85	4.62	4.69
PM-10	San Juan de Dios																								
	SONY	4.74	4.78	4.78	4.78	4.73	4.60	3.78	3.78	3.33	3.92	4.00	4.57	4.64	4.48	4.58	4.67	4.11	3.92	4.00	3.58	3.80	4.15	4.10	3.58
	Cazucá	4.38	4.57	4.10	4.37	4.49	4.22	3.29	3.62	3.34	3.25	3.96	4.04	4.32	4.47	4.41	4.55	4.49	4.63	3.97	3.90	3.91	4.30	3.37	3.48
NO2	San Juan de Dios																								
	SONY	4.90	4.85	4.83	4.90	4.87	4.88	4.78	4.34	4.63	4.83	4.92	4.97	4.81	4.86	4.94	4.87	4.58	4.53	4.73	4.73	4.76	4.75	4.79	4.86
	Cazucá	4.84	4.86	4.81	4.83	4.85	4.85	4.83	4.61	4.53	4.74	4.76	4.84	4.89	4.88	4.89	4.83	4.82	4.71	4.81	4.70	4.76	4.75	4.80	4.80
O3	SONY	4.82	4.89	4.89	4.85	4.89	4.87	4.91	4.71	4.25	3.90	4.22	4.57	4.75	4.72	4.68	4.86	4.85	4.86	4.90	4.92	4.93	4.94	4.90	4.93
	San Juan de Dios																								
	Cazucá	4.87	4.87	4.97	4.97	4.91	4.90	4.94	4.85	4.20	4.25	4.59	4.71	4.72	4.70	4.72	4.78	4.80	4.89	4.94	4.92	4.98	4.95	4.97	4.95

ANEXO 9. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE DE BOGOTÁ, ZONA SUR, NOVIEMBRE 15 DE 1997

TABLA 3. Índice por parámetro para la zona sur. Noviembre 15-97

Parámetro	VALOR DEL ÍNDICE HORARIO POR PARÁMETRO PARA LA ZONA SUR																							
	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
CO	4.99	4.98	4.98	4.98	4.98	4.94	4.96	4.93	4.96	4.97	4.97	4.98	4.97	4.97	4.97	4.94	4.92	4.94	4.92	4.93	4.94	4.95	4.94	4.96
SO2	4.95	4.91	4.92	4.90	4.94	4.54	4.67	4.55	4.73	4.86	4.89	4.93	4.89	4.90	4.91	4.81	4.76	4.78	4.75	4.78	4.90	4.85	4.82	4.89
PM-10	4.36	4.57	4.10	4.37	4.49	4.22	3.29	3.82	3.33	3.25	3.96	4.04	4.32	4.47	4.41	4.53	4.11	3.92	3.97	3.58	3.80	4.15	3.37	3.48
NO2	4.84	4.85	4.81	4.83	4.85	4.85	4.78	4.34	4.53	4.74	4.78	4.84	4.81	4.86	4.89	4.87	4.58	4.53	4.81	4.70	4.78	4.75	4.79	4.80
O3	4.82	4.87	4.89	4.85	4.89	4.87	4.91	4.71	4.20	3.90	4.22	4.57	4.72	4.70	4.88	4.78	4.80	4.86	4.90	4.92	4.93	4.94	4.90	4.93











ANEXO 11. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE DE BOGOTÁ, ZONA CENTRO, DICIEMBRE 13 DE 1997

TABLA 3. Índice por parámetro para la zona centro. Diciembre 13-97

Parámetro	ÍNDICE HORARIO PARA CADA ESTACIÓN Y PARA CADA PARÁMETRO																							
	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
CO	4.91807	4.9542	4.9542	4.9313	4.9161	4.9313	4.8321	4.5117	4.2904	4.5117	4.6948	4.77873	4.82451	4.89318	4.79399	4.83214	4.83977	4.80925	4.72532	4.71769	4.68428	4.62613	4.70243	4.74058
SO2	4.85	4.89	4.83	4.89	4.81	4.61	4.07	4.29	4.54	4.88	4.88	4.88	4.82	4.74	4.68	4.59	4.76	4.74	4.82	4.68	4.61	4.78	4.70	4.74
PM-10	2.87	3.63	4.54	4.45	4.57	4.30	4.03	3.93	3.90	3.59		3.97	4.07	4.03	3.90	4.15	4.15	4.23	4.22	4.32	4.23	4.17	4.03	3.79
NO2	4.81	4.83	4.85	4.88	4.87	4.89	4.89	4.76	4.32	4.60	4.70	4.75	4.79	4.77	4.81	4.84	4.85	4.81	4.77	4.74	4.75	4.75	4.76	4.76
O3	4.92	4.92	4.93	4.93	4.93	4.91	4.90	4.89	4.81	4.05	3.74	3.90	3.95	4.13	4.28	4.49	4.60	4.69	4.85	4.93	4.92	4.92	4.92	4.92

ANEXO 12. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE DE BOGOTÁ, ZONA SUR, DICIEMBRE 13 DE 1997

TABLA 1. Información utilizada para el cálculo del índice correspondiente a la zona sur para diciembre 13/97

Parámetro	Estación	DATOS HORARIOS ARROJADOS POR LA RED DE MONITOREO																							
		00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
CO	San Juan de Dios	4.4	5.2	4.0	4.0	2.8	4.6	5.5	6.5	8.7	5.3	4.7	3.2	2.8	2.3	2.5	2.1	2.2	3.0	3.4	3.5	5.2	6.3	6.9	6.8
	SONY	5.2	4.4	4.4	4.4	4.6	6.7	6.5	10.2	11.1	5.9	4.3	3.5	7.0	6.2	4.9	4.6	5.0	4.4	3.6	6.0	12.0	11.5	11.8	9.4
	Cazucá	3.8	3.8	3.8	3.3	4.1	6.2	6.6	10.7	11.2	6.3	4.4	4.0	3.6	3.5	3.5	3.5	3.8	4.1	4.9	3.8	3.3	8.0	7.0	7.2
SO2	San Juan de Dios																								
	SONY	19	34	33	53	29	51	24	64	75	41	13	9	18	17	16	11	13	14	8	10	16	33	38	27
	Cazucá	8	15	9	36	15	11	17	51	50	30	17	8	4	5	4	4	4	4	5	5	5	29	43	34
PM-10	San Juan de Dios	71	78	85	93	98	103	122	181	195	244	156	142	90	117	122	105	88	81	83	107	81	95	120	127
	SONY	86	89	44	50	60	64	133	161	207	234	104	95	74	103	88	76	73	74	66	80	102	114	145	156
	Cazucá	205	103	115	103	237	178	144	151	247	354	186	139	95	110	56	59	54	95	51	78	98	61	291	176
NO2	San Juan de Dios																								
	SONY	5	4	5	5	5	8	5	12	24	11	8	4	10	8	6	5	5	5	3	5	10	6	7	6
	Cazucá	27	26	26	24	21	22	22	49	123	67	33	29	23	21	19	16	23	26	31	25	14	42	33	29
O3	San Juan de Dios																								
	SONY	6	7	6	6	6	7	8	12	60	109	118	83	54	49	46	39	31	31	35	23	8	8	8	6
	Cazucá	7	7	6	6	6	8	9	10	34	83	103	94	76	63	44	35	27	13	6	7	7	7	7	7

ANEXO 12.CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE DE BOGOTÁ, ZONA SUR, DICIEMBRE 13 DE 1997

TABLA 2.Cálculo del índice horario por parámetro y por estación, zona sur, diciembre 13/97

Parámetro	Estación	ÍNDICE HORARIO PARA CADA ESTACIÓN Y PARA CADA PARÁMETRO																							
		00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
CO	San Juan de Dios	4.66	4.60	4.69	4.69	4.79	4.65	4.58	4.50	4.34	4.60	4.64	4.76	4.79	4.82	4.81	4.84	4.83	4.77	4.74	4.73	4.80	4.52	4.47	4.48
	SONY	4.60	4.66	4.66	4.68	4.65	4.49	4.50	4.22	4.15	4.55	4.67	4.73	4.47	4.53	4.63	4.65	4.62	4.66	4.73	4.54	4.08	4.12	4.10	4.28
	Cazucá	4.73	4.71	4.71	4.75	4.69	4.53	4.50	4.18	4.15	4.52	4.66	4.69	4.73	4.73	4.73	4.73	4.71	4.69	4.63	4.71	4.75	4.39	4.47	4.45
SO2	San Juan de Dios																								
	SONY	4.86	4.76	4.76	4.65	4.81	4.67	4.84	4.58	4.51	4.73	4.91	4.94	4.88	4.89	4.90	4.93	4.91	4.91	4.95	4.93	4.90	4.78	4.76	4.82
	Cazucá	4.95	4.90	4.94	4.76	4.90	4.93	4.89	4.67	4.67	4.60	4.69	4.95	4.97	4.97	4.97	4.97	4.97	4.97	4.97	4.97	4.97	4.81	4.72	4.78
PM-10	San Juan de Dios	4.38	4.32	4.28	4.19	4.15	4.10	3.98	3.66	3.58	3.33	3.79	3.86	4.22	3.99	3.98	4.09	4.23	4.30	4.19	4.07	4.30	4.17	3.97	3.94
	SONY	4.25	4.40	4.82	4.57	4.48	4.44	3.91	3.76	3.52	3.38	4.10	4.17	4.36	4.10	4.23	4.34	4.37	4.36	4.43	4.30	4.11	4.01	3.84	3.79
	Cazucá	3.53	4.10	4.00	4.10	3.37	3.67	3.85	3.81	3.31	2.76	3.83	3.88	4.17	4.04	4.51	4.49	4.53	4.17	4.56	4.32	4.15	4.47	3.09	3.68
NO2	San Juan de Dios																								
	SONY	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	4.97	4.98	4.94	4.88	4.95	4.97	4.98	4.95	4.96	4.97	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	4.95	4.96	4.97	4.97
	Cazucá	4.87	4.88	4.88	4.88	4.90	4.89	4.89	4.76	4.41	4.66	4.84	4.86	4.89	4.90	4.81	4.91	4.89	4.86	4.85	4.88	4.93	4.80	4.84	4.86
O3	San Juan de Dios																								
	SONY	4.93	4.92	4.93	4.93	4.93	4.92	4.91	4.86	4.31	3.86	3.80	4.05	4.38	4.44	4.47	4.55	4.64	4.64	4.60	4.74	4.81	4.91	4.91	4.93
	Cazucá	4.92	4.92	4.93	4.93	4.93	4.91	4.90	4.89	4.81	4.05	5.00	3.90	3.95	4.13	4.26	4.49	4.60	4.69	4.65	4.93	4.92	4.92	4.92	4.92

ANEXO 12. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE DE BOGOTÁ, ZONA SUR, DICIEMBRE 13 DE 1997

TABLA 3. Índice por parámetro para la zona sur. Diciembre 13-97

Parámetro	ÍNDICE HORARIO PARA CADA ESTACIÓN Y PARA CADA PARÁMETRO																							
	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
CO	4.60	4.60	4.66	4.66	4.65	4.49	4.50	4.18	4.15	4.52	4.64	4.69	4.47	4.53	4.63	4.65	4.62	4.66	4.63	4.54	4.08	4.12	4.10	4.28
SO2	4.88	4.78	4.78	4.65	4.81	4.67	4.64	4.58	4.51	4.73	4.89	4.94	4.88	4.89	4.90	4.93	4.91	4.91	4.95	4.93	4.90	4.78	4.72	4.78
PM-10	3.53	4.10	4.00	4.10	3.37	3.67	3.85	3.66	3.31	2.76	3.63	3.66	4.17	3.99	3.96	4.09	4.23	4.17	4.19	4.07	4.11	4.01	3.09	3.68
NO2	4.87	4.88	4.88	4.88	4.90	4.89	4.89	4.76	4.41	4.66	4.84	4.68	4.89	4.90	4.91	4.91	4.89	4.88	4.85	4.88	4.93	4.80	4.84	4.66
O3	4.92	4.92	4.93	4.93	4.93	4.91	4.90	4.86	4.31	3.88	3.80	3.90	3.95	4.13	4.28	4.49	4.60	4.64	4.60	4.74	4.91	4.91	4.91	4.82